

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

### Monitorizace rozměrových změn vytlačovaného profilu

### Monitoring dimensional changes extrusion profile

Jiří Habr

**KSP - TP - 817**

Vedoucí diplomové práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld – *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

#### Rozsah práce a příloh:

Počet stran	72
Počet tabulek	9
Počet příloh	0
Počet obrázků	51
Počet vzorců	5

**Datum: 5.6.2009**



# ANOTACE

## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Jiří Habr

Téma práce: **Monitorizace rozměrových změn vytlačovaného profilu**  
**Monitoring dimensional changes extrusion profile**

Číslo DP: KSP - TP - 817

Vedoucí DP: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

### **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá monitorizací rozměrových změn vytlačovaného parizonu u technologie extruzního vyfukování na stroji GM 251. Cílem diplomové práce je objasnit vliv materiálu a technologických parametrů na narůstání průměru parizonu.

### **Abstract:**

The diploma work deals with the monitoring of extrusion parison dimensional changes by extrusion blowing technology by means of the machine GM 251. The aim of diploma work is described the influence of material and technological parameters on the growing of parison diameter.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....  
Jiří Habr  
Michovka 7  
468 22 Železný Brod

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval těm, kteří mne podporovali při zpracovávání této diplomové práce.

Mé poděkování patří zejména vedoucímu mé diplomové práce prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, mému konzultantovi Ing. Jiřímu Sobotkovi, PhD., dále pak RNDr. Petru Salačovi, CSc a ostatním pracovníkům Katedry strojírenské technologie z Oddělení tváření kovů a plastů za poskytnutou pomoc, cenné rady a připomínky a zapůjčené materiály. Bez jejich vedení a dohledu by tato práce nevznikla.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval svým rodičům za vytrvalou podporu v průběhu mého studia.



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Výroba dutých těles .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Stroje pro vyfukování.....</b>	<b>12</b>
2.2.1	Požadavky kladené na vlastnosti strojů .....	13
<b>2.3</b>	<b>Extruzní vyfukování .....</b>	<b>14</b>
2.3.1	Varianty procesu extruzního vyfukování .....	16
<b>2.4</b>	<b>Materiály vhodné pro vyfukování .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Polotovar extruzního vyfukování – parizon .....</b>	<b>19</b>
2.5.1	Popis průvodních jevů procesu vyfukování – narůstání a protažení parizonu .....	19
2.5.2	Viskoelastické chování polymerů.....	22
2.5.3	Reologie tavenin polymeru .....	25
2.5.4	Vliv materiálu na narůstání parizonu.....	28
2.5.5	Vliv geometrie trysky na narůstání parizonu .....	30
2.5.6	Vliv technologických parametrů na narůstání parizonu .....	31
2.5.7	Následky narůstání a protahování parizonu .....	33
2.5.8	Možnosti eliminace narůstání a protahování parizonu.....	34
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>Výběr materiálů .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Parametry vyfukovacího stroje GM 251 .....</b>	<b>39</b>
3.2.1	Nastavení vyfukovacího stroje GM 251 .....	40
<b>3.3</b>	<b>Snímání profilu parizonu po celé délce.....</b>	<b>42</b>
3.3.1	Popis snímacího zařízení .....	42
3.3.2	Popis použitého software.....	43
3.3.3	Postup měření .....	44
<b>3.4</b>	<b>Naměřené hodnoty.....</b>	<b>46</b>
3.4.1	Materiál polyetylén Liten BB 29 .....	46
3.4.2	Materiál polyetylén Bralen RB 2-62 .....	47
3.4.3	Materiál polypropylén Mosten GB 005.....	48
3.4.4	Materiál polypropylén Tiplen R 659 .....	49
<b>3.5</b>	<b>Hodnocení výsledků a jejich diskuse .....</b>	<b>50</b>



---

<b>3.6</b>	<b>Matematický popis jevu - narůstání průměru parizonu .....</b>	<b>57</b>
3.6.1	Regresní analýza .....	57
3.6.2	Výběr vhodného regresního modelu .....	57
3.6.3	Určení rovnice regresního modelu .....	60
<b>3.7</b>	<b>Hodnocení výsledků a jejich diskuse .....</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>71</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>Zkratka:</b>	<b>Význam:</b>
3D	třídimenzionální
BFT	Blow Molding Foam Technology (vyfukování s vypěněnou vrstvou)
BMP	typ formátu souboru
DMH	distribuce molekulové hmotnosti
HS	high speed (vysokorychlostní)
IML	In-Mould Labeling (vyfukování s etiketováním ve formě)
ITT	index toku taveniny
PA	polyamid
PC	polykarbonát
PE	polyetylén
PE-HD	vysokohustotní polyetylén
PE-LD	nízkohustotní polyetylén
PET	polyetylentereftalát
PMMA	polymethylmetakrylát
PND	typ formátu souboru
POM	polyoxymetylén
PP	polypropylén
PS	polystyrén
PVC	polyvinylchlorid
PWDS	Partialwanddickesteuerung (parciální regulace tloušťky stěny)
TPE	termoplastické elastomery
TPU	termoplastické polyuretany
UV	ultrafialové záření



<b>Symbol:</b>	<b>Význam [Jednotka]</b>
A	abraze [g]
$B_p$	poměr narůstání průměru parizonu [-]
$B_t$	poměr narůstání tloušťky stěny [-]
D	smyková rychlost [ $s^{-1}$ ]
$D_d$	střední průměr vytlačovací hubice [mm]
$D_p$	střední průměr parizonu po výstupu z hubice [mm]
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
$h_d$	šířka stěrby vytlačovací hubice [mm]
$h_p$	tloušťka stěny parizonu po výstupu z hubice [mm]
l	délka parizonu [mm]
MFR	melt mass-flow rate (hmotnostní index toku taveniny) [g/10min]
n	otáčky stroje [ot/min]
$\varnothing D$	průměr parizonu [mm]
$R^2$	koeficient determinace [-]
$\eta$	dynamická viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
$\eta_N$	newtonská viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
$\eta_{ZD}$	zdánlivá viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
$\rho$	hustota [ $g/cm^3$ ]

## 1 ÚVOD [1], [2]

Plasty si již po dobu své relativně krátké existence stačily vydobýt místo mezi osvědčenými materiály, jejichž vlastnosti jsou lidstvem prověřovány stovky, mnohdy i tisíce let. Oproti tomu plasty, které svojí historii začaly psát v poměrně nedávné době, prošly nečekaně rychlým a intenzivním vývojem v posledních zhruba sto letech. Za tak krátkou dobu se však plasty, svými vlastnostmi dokázaly plnohodnotně zařadit mezi moderní konstrukční materiály.

Podle objemu dnes již polymerní materiály představují nejvýznamnější část výroby a spotřeby mezi všemi technickými materiály, jejich podíl dokonce nadále roste. Tento nárůst je jistě způsoben jejich všestranně výhodnými vlastnostmi, jako například tepelné a elektroizolační vlastnosti, nízká měrná hmotnost, kluzné vlastnosti i bez použití maziv, propustnost elektromagnetických vln a gama-záření, schopnost tlumit rázy a v neposlední řadě příznivý poměr mezi užitnými vlastnostmi a cenou.

Právě jejich vlastnosti a rychlý technický rozvoj otevírají stále nové možnosti využití plastů ve všech oblastech lidské činnosti. Již dnes můžeme najít aplikace plastů nejenom ve strojírenství, ale i ve stavebnictví, elektrotechnice, zdravotnictví, letecké technice, a mnoha dalších.

I když podíl technologie vyfukování zaujímá v České republice mezi plastikářskými technologiemi pouze okolo 5% a její úloha se tak může zdát nedůležitá, její postavení by ve výrobě dutých obalů byla jen těžko nahraditelná. Z tohoto důvodu se tato diplomová práce zabývá zkoumáním průvodních jevů, ke kterým dochází při extruzním vyfukování a dalších technologiích, u nichž je polotovár vyráběn vytlačováním. Zejména pak narůstáním rozměrů vytlačovaného profilu při opuštění vytlačovací hubice. Přestože tyto průvodní jevy ovlivňují stabilitu procesu a výslednou kvalitu výrobků, dosud se jimi nikdo podrobně nezabýval. Proto se tato práce snaží detailněji objasnit příčiny těchto jevů a najít takové možnosti jejich eliminace, které by se uplatnily v průmyslové praxi.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Výroba dutých těles [1], [2]

Pod pojmem duté těleso se skrývá široký sortiment tvarově rozličných, obvykle uzavíratelných obalů (obr. 2.1). Tyto obaly se běžně vyrábějí od objemu 1ml až do 1 000 litrů, a i více.

Patří sem například láhve, sudy, kanistry, nádrže aj.



Obr. 2.1: Typy dutých těles [2]

Základním požadavkem obalů je jejich funkčnost, což je dáno jejich použitím. Předpoklady použití tvoří zejména tvarová stabilita, odolnost proti pádu a statickému namáhání, dále pak odolnost vůči UV záření, transparentnost (barevnost) a v neposlední řadě také chemická odolnost. Největší vliv na výše uvedené vlastnosti obalu má použitý materiál a výrobní technologie. Výrobních technologií pro výrobu dutých těles je celá řada. Například extruzní vyfukování, vstřikovací vyfukování, vstřikovací vyfukování s dloužením, vyfukování z folií, atd. Tyto technologie se liší typem polotovaru. Mezi uvedenými technologiemi má výsadní postavení extruzní vyfukování, čili vyfukování, u kterého je polotovar vyráběn vytlačováním. Nejběžnější materiály používané pro výrobu dutých těles jsou polyolefiny. Tyto materiály splňují výše uvedené požadavky a navíc patří mezi nejlevnější.

## 2.2 Stroje pro vyfukování [1], [3]

Rozvoj výroby dutých těles byl podnětem k vývoji mnoha vyfukovacích strojů (obr. 2.2). Vyfukovací stroje můžeme dělit podle různých hledisek. Především je dělíme na stroje bez zásobníku a na stroje se zásobníkem taveniny, sloužící k vyfukování nádob o větším objemu. Poznáme je podle toho, že vytlačování taveniny probíhá kontinuálně a k hromadění taveniny dochází v zásobníku. Odtud je teprve tavenina v cyklech vytlačována jednonásobnou vytlačovací hubicí s uzávěrem do otevřené formy. Uzavírání formy probíhá horizontálně a vyfukovací trn se nachází vždy dole. Vyjímání výrobků probíhá většinou ručně, jelikož se jedná o výrobky větších rozměrů. Stroje bez zásobníku taveniny se používají k výrobě menších těles a pracují plně automaticky. Tavenina je hubicí vytlačována plynule. Pokud stroj pracuje se dvěma formami, dochází k jejich střídavému přisunování k vytlačovací hlavě (například po šikmé ploše). Potom je vytlačený polotovar (parizon) sevřen formou a vyhřívaným nožem odříznut. Následně dojde k přesunu formy s parizonem do míst, kde probíhá vyfukování trnem, který do parizonu zajíždí shora. V průběhu chlazení se vytlačuje další parizon a připravuje se druhá forma. Pokud stroj pracuje pouze s jednou formou, je tavenina vytlačována jednonásobnou až pětinasobnou vytlačovací hubicí.

Podle směru pohybu formy se vyfukovací stroje dělí na:

- Stroje s vertikálně se pohybující formou (forma má dvě polohy). Ve spodní probíhá vyfukování, v horní uchycení a oddělení parizonu.
- Stroje se dvěma pohybujícími se formami vodorovně nebo šikmo. Jejich pohyb je řízen tak, že zatímco v jedné formě probíhá vyfukování, druhá je prázdná a připravuje se uchopit parizon.
- Stroje s rozvaděčem taveniny v centrální vytlačovací hlavě se stabilní polohou dvou forem, k nimž je střídavě přiváděn parizon.

### 2.2.1 Požadavky kladené na vlastnosti strojů [1], [3], [4]

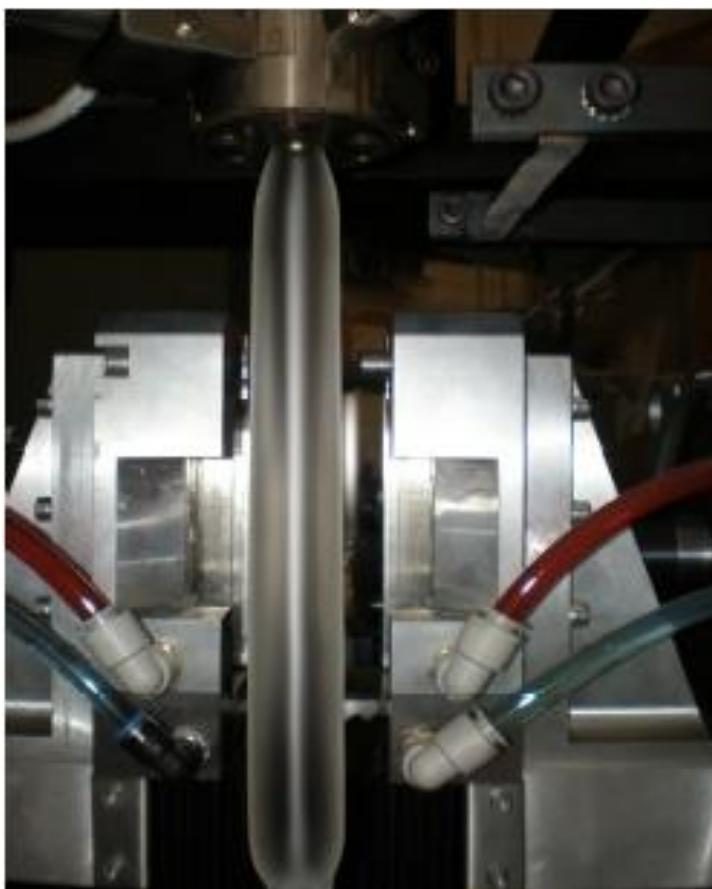
- Teplota pracovního válce i šneku musí být regulovatelná.
- Vytlačovací hlava musí umožňovat nastavení správné tloušťky stěny parizonu.
- Možnost výměny hubice, aniž by bylo nutné demontovat celou hlavu.
- Hlava musí být vybavena snímačem teploty a tlaku.
- Vytlačovací stroj musí pracovat bez pulzací, aby měl parizon stejný průřez a neobsahoval bubliny.
- Zavírací jednotka musí být konstruována tak, aby byla možná co nejjednodušší výměna forem.
- Forma musí být sevřena a udržována takovou silou (menší než u vstřikování), při které nemůže dojít k jejímu pootevření.



Obr. 2.2: Vyfukovací stroj GM 5001 [5]

## 2.3 Extruzní vyfukování [1], [2], [3], [6], [7]

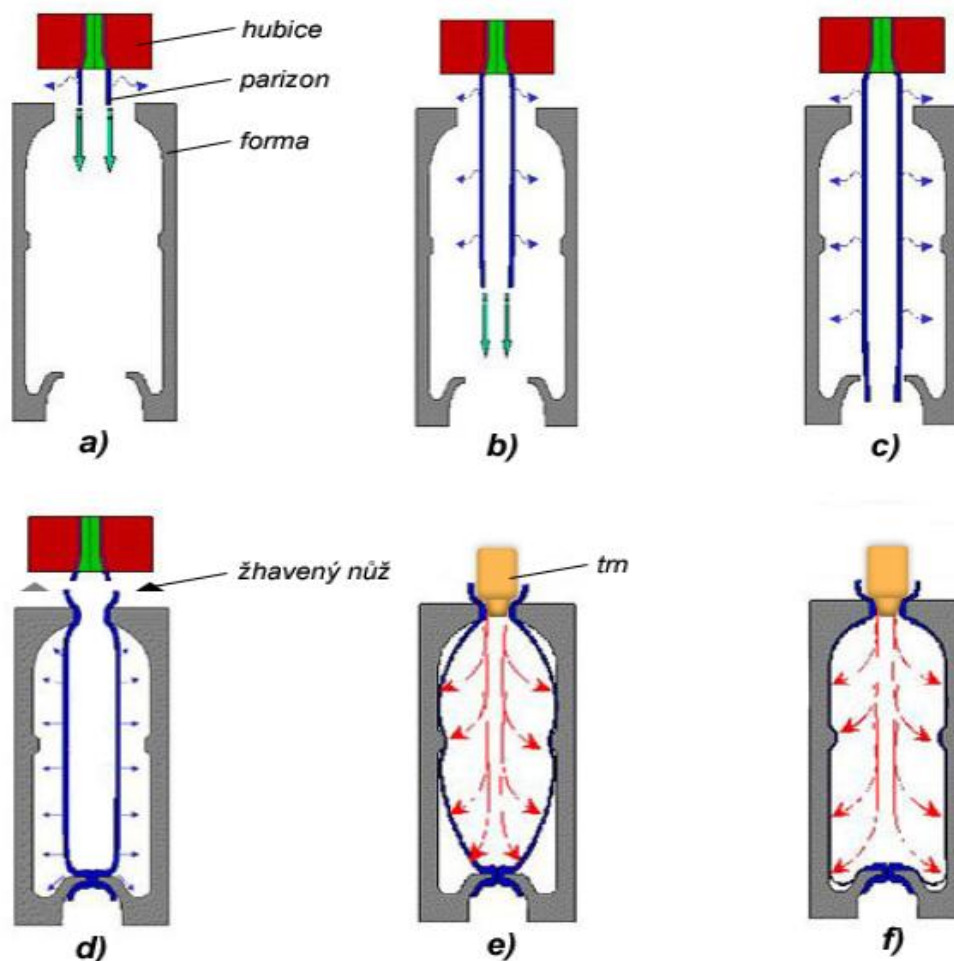
Extruzní vyfukování neboli vyfukování vytlačovaného polotovaru je velmi rozšířený způsob výroby dutých těles. Jedná se o produktivní technologii, kterou lze snadno automatizovat. U této technologie se vytlačuje tavenina polymeru s různými aditivami pomocí šnekové plastikační jednotky přímou nebo příčnou vytlačovací hlavou s regulovatelnou kruhovou hubicí. Vzniklý polotovar je nekonečná trubka, která se nazývá parizon.



Obr. 2.3: Vytlačování parizonu [3]

Na obr. 2.3 a obr. 2.4 je parizon vytlačován kontinuálně. Po dosažení nastavené délky se přeruší paprsek optického senzoru, který dá systému stroje impuls k přisunutí a uzavření dvoudílné formy. Uzavřením dojde ke svaření dna a také k odříznutí parizonu vyhřívaným nožem. Forma následně odjede z prostoru pod hlavou, aby se uvolnil prostor pro další parizon. V pozici určené pro vyfukování parizonu sevřeného ve formě je shora vtlačen

trn který, parizon utěsní, vytvaruje hrdlo se závitem a umožní přívod stlačeného vzduchu k vyfouknutí do požadovaného tvaru dle dutiny formy.



Obr. 2.4: Princip extruzního vyfukování [7]

a) – počátek vytlačování parizonu; b) – vytlačování parizonu a jeho prodlužování účinkem vlastní tíhy;  
c) – dosažení potřebné délky parizonu, najetí formy pod hubici; d) – sevření parizonu formou, svaření dna, odříznutí parizonu; e) – najetí formy pod vyfukovací tm, vtlačení trnu, počátek vyfukování tlakovým vzduchem; f) – konec vyfukování, finální tvar výrobku s přetoky

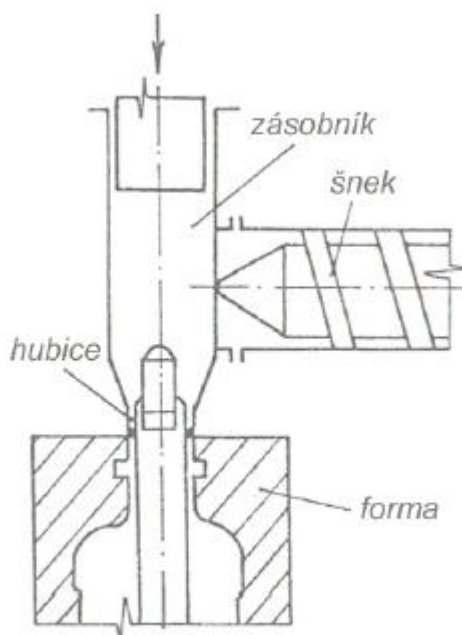
Jelikož podobně jako u vstřikování termoplastů představuje chlazení nejdelší úsek pracovního cyklu, tak i v případě vyfukování musí být výrobek ve formě chlazen. Parizon musí co nejrychleji opustit vytlačovací hlavu rovnoměrně prohřátý (teplotně homogenní), aby měl dostatečnou teplotu pro svaření dna. Rovněž je vhodné zkrátit pracovní cyklus stroje z důvodu eliminace neřízeného protahování parizonu a možnosti dosažení jeho



rovnoměrné tloušťky. Vzniklé technologické odpady zvané přetoky se po otevření formy automaticky oddělí a takto vzniklý odpad se po rozdrčení vrací zpět k opětovnému zpracování.

Parizon je také možné vyfukovat tak, že se stlačený vzduch přivádí jehlou z boku těsně nad hrdlem. Tato část se později odstraní. Technologií přímého vytlačování (kontinuální extruze) parizonu s následným vyfouknutím se vyrábějí dutá tělesa do objemu přibližně 10 litrů.

U větších těles se používají vytlačovací stroje se zásobníkem roztaveného plastu (obr. 2.5), kde je možné omezit dobu vlastního vytlačování na několik sekund. Nehrozí tak veliké nežádoucí ochlazování parizonu na vzduchu, nebo protahování vlastní tíhou, které má za následek nerovnoměrnou tloušťku stěny finálního výrobku a nestabilitu celého technologického procesu.



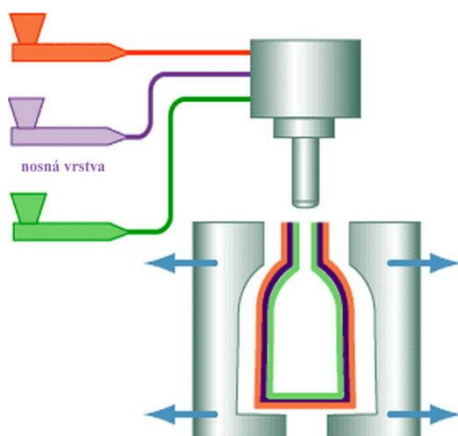
Obr. 2.5: Vyfukovací stroj se zásobníkem roztaveného plastu [1]

### 2.3.1 Varianty procesu extruzního vyfukování [8], [9], [10], [11]

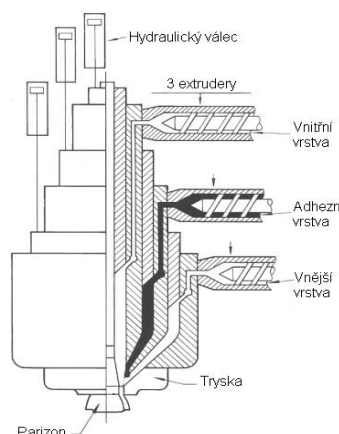
Zvláštním případem vytlačovacího vyfukování je koextruzní vyfukování, které umožňuje výrobu vícevrstvých dutých těles (obr. 2.6). U této technologie jsou samostatné šnekové plastikační jednotky napojeny na



společnou vytlačovací hlavu a přivádějí taveniny plastů. Koextruzní vytlačovací hlava (obr. 2.7) je řešena tak, aby nedošlo ke smísení tavenin polymerů a vyrobil se vícevrstvý soudržný parizon. Takto vyráběné výrobky se vyznačují zejména lepšími mechanickými vlastnostmi, vyšší chemickou odolností a výrazně menší propustností plynů a par. Jako výhodu lze také považovat možnost použití recyklovaných materiálů v tzv. recyklovaných vrstvách.



Obr. 2.6: Princip koextruze [12]



Obr. 2.7: Koextruzní vytlačovací hlava [12]

Metoda 3D vyfukování umožňuje výrobu tvarově složitých dutých výrobků zakřivených ve třech osách. Typickými výrobky jsou trubky rozvodu vzduchu či provozních náplní v automobilu. Při klasickém způsobu vyfukování by ovšem docházelo k enormnímu nárůstu množství přetoků (hmotnost přetoků může být mnohonásobkem hmotnosti výrobku) kolem celého výrobku, nemožnosti jejich automatického oddělování a zvýšenému nároku na zavírací sílu stroje. Značných úspor (materiálu, energie, doby cyklu apod.) je možné dosáhnout použitím speciálních vyfukovacích strojů. Tyto stroje jsou konstruovány tak, aby bylo možné docílit výroby s minimálním množstvím přetoků. Vytlačovaný parizon má menší průměr než typický rozměr výrobku a je tvarován či přenášen přímo do tvarové dutiny formy, čím je délka svařovacích hran redukována na minimum. Pro manipulaci s parizonem jsou používána různá periferní zařízení, jako jsou programovatelné roboty nebo podtlakové systémy.

Etiketování ve formě (In-Mould Labeling) je zajímavý způsob dekorace při výrobě plastových výrobků vstřikováním nebo vyfukováním. K vložení papírové nebo plastové etikety do formy dochází v průběhu cyklu po otevření formy a vyjmutí předchozího výrobku. K přenosu etikety ze zásobníku je použito rameno s podtlakovou hlavicí. Etiketa je v dutině formy fixována podtlakem. Po dotyku plastu s etiketou dochází k jejich spojení. Správné umístění etikety lze kontrolovat podtlakem ve formě.

Jako další varianty procesu lze uvést např. vyfukování s vypěněnou vrstvou (BFT) nebo vyfukování vyztužených plastů.

## **2.4 Materiály vhodné pro vyfukování [2], [8], [9], [10]**

Vyfukováním lze zpracovávat v podstatě všechny typy termoplastů. Základními vlastnostmi, které mají podstatný vliv na zpracování touto metodou, jsou zejména tokové vlastnosti (ITT), dále pak hustota, molekulová hmotnost, viskoelastická a také reologické chování taveniny termoplastu. Z hlediska těchto vlastností jsou ze semikrystalických plastů nejvhodnější například PE-LD, PE-HD, PP (společně tvoří až  $\frac{3}{4}$  produkce), PA a v menší míře i POM. Z amorfních termoplastů se používají zejména modifikovaný PET, PVC, PC nebo také kopolymery PS. Pro výrobu technických předmětů v automobilovém průmyslu lze zpracovávat termoplastické elastomery jako např. TPE, TPU apod.

Prvním důležitým požadavkem pro úspěšné zpracování je vhodná viskozita polymeru. Příliš nízká viskozita má za následek nestabilitu parizonu a dochází tak k jeho přílišnému protahování za hubicí, které je způsobeno vlastní hmotností. Proces se tak stává nekontrolovatelným s ohledem na tloušťku stěny a stabilitu procesu. V opačném případě, je-li viskozita příliš vysoká, nemusí dojít k úplnému rozfouknutí a parizon se může poškodit ještě předtím, než se dotkne stěny dutiny formy.

Dalším důležitým faktorem je rozsah zpracovatelských teplot polymeru. Nejvíce používané materiály jako polyetylén a polypropylén patří do skupiny polyolefinů, které mají širší pásmo zpracovatelských teplot (cca. 30 °C) oproti polyesterům, polykarbonátům a polyamidům, u kterých je toto

pásmo užší (max. 15 °C). Důležitou roli v tomto ohledu sehrává i čas, protože parizon natéká kontinuálně a před uzavřením formy jeho teplota klesá vlivem chladnějšího okolního vzduchu a to zejména v jeho spodní části, kde se jeho následné tvarování stává obtížnější. Velikost ochlazení má pak největší vliv na kvalitu svaru spodní části (dno lahve).

## **2.5 Polotovar extruzního vyfukování – parizon [8], [9]**

Parizon je horká, nekonečná trubka plastu ve formě taveniny, která je vytlačována štěrbinou vytlačovací hlavy. Tato štěrbina je tvořena vytlačovací hubicí a vytlačovacím trnem. Štěrbina má tvar mezikruží, jehož velikost je dána vzájemnou polohou hubice a trnu. Průtok taveniny mezikruhovou štěrbinou ovlivňuje několik faktorů:

- Tlaková ztráta
- Působení sil na vytlačovací trn
- Rychlostní profil (distribuce rychlostí toku taveniny)

Průtok taveniny vytlačovací hlavou je jedním z faktorů, který významně ovlivňuje narůstání parizonu za vytlačovací hubicí. Právě faktory jako, silové poměry a distribuce rychlosti jsou dány především viskózními vlastnostmi taveniny, přičemž viskozita taveniny je funkcí teploty a smykové rychlosti.

### **2.5.1 Popis průvodních jevů procesu vyfukování – narůstání a protažení parizonu [8], [9]**

Jev narůstání doprovází ve větší či menší míře tvorbu každého parizonu a významně ovlivňuje kvalitu následně vyfukovaného tělesa. K narůstání taveniny dochází okamžitě po tom, co tavenina opustí vytlačovací štěrbinu, čili v místě hned pod hubicí vytlačovací hlavy. Tavenina vlivem své částečné stlačitelnosti tak při poklesu tlaku zvětšuje svůj objem, což to se projevuje nejen zvětšením průměru parizonu ale i zvětšením tloušťky stěny.

Tloušťku stěny výrobku lze dát do vztahu s poměrem narůstání parizonu takto:

$$B_t = \frac{h_p}{h_d}$$

Podobně narůstání průměru parizonu:

$$B_p = \frac{D_p}{D_d}$$

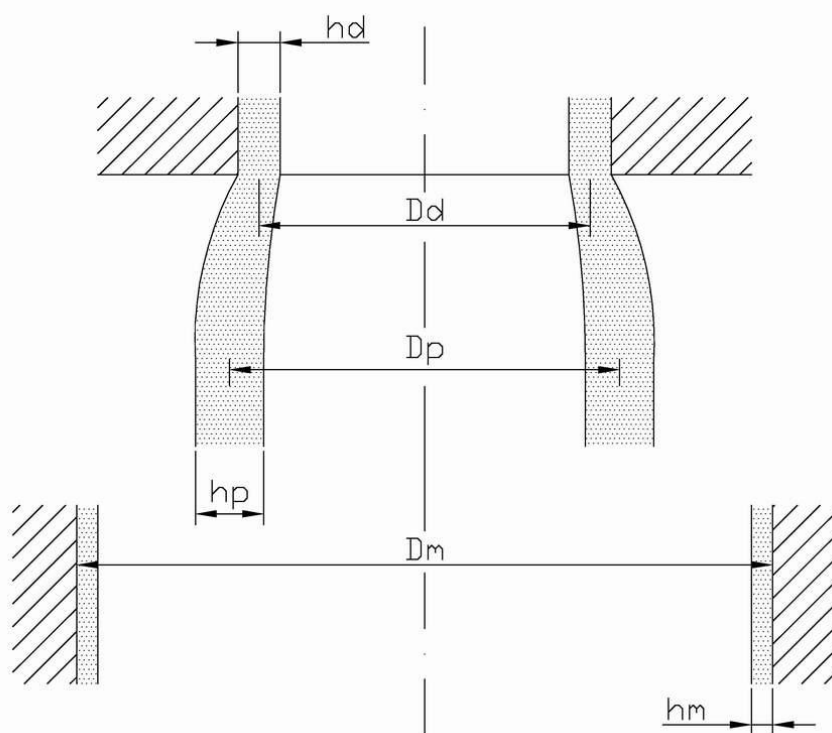
Dále pomocí vztahu:

$$B_t = B_p^2$$

získáme výraz:

$$h_p = h_d \cdot B_p^2$$

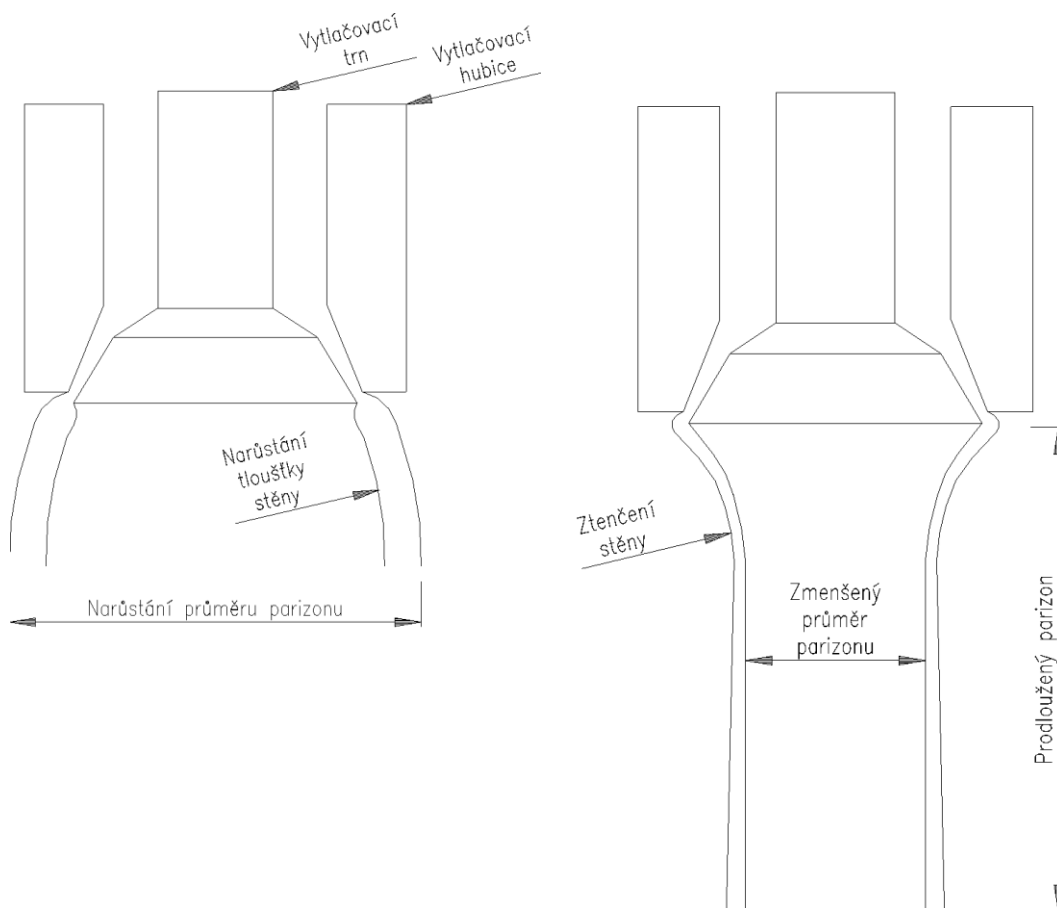
Poměr narůstání  $B_p$  závisí na vratné (elastické) deformaci, kterou lze experimentálně stanovit.



Obr. 2.8: Vztah tloušťky, poměru narůstání parizonu a vyfukovaného výrobku [8]

Jak již bylo řečeno, parizon je horká trubka ve formě taveniny vytlačována svisle do volného prostoru a právě díky tomu že je tato trubka v plastickém stavu, projevuje se na ní vliv gravitační síly. Gravitační síla

způsobuje deformaci, které říkáme protažení parizonu. Toto protažení může v extrémním případě způsobit i tzv. ztenčení parizonu, což znamená, že vlivem vlastní tíhy může dojít i k nekontrolovatelnému zmenšení tloušťky stěny parizonu i jeho průměru (obr. 2.9). Protahování parizonu se začne projevovat až při dosažení určité délky, protože s rostoucí délkou roste hmotnost parizonu a tudíž i velikost gravitační síly, která na něj působí. Proto je protahování u krátkého parizonu prakticky zanedbatelné ale naopak u parizonu dlouhého je to jev, se kterým je nutné počítat, jelikož by mohl vážně narušit stabilitu procesu vyfukování.



Obr. 2.9: Narůstání, protažení a ztenčení parizonu [8]

K těmto jevům dochází v důsledku charakteristických vlastností polymerů:

- viskoelastická
- reologie tavenin polymerů

O tom, jak se jednotlivé jevy budou projevovat, rozhoduje několik faktorů:

- výběr materiálu (hustota, ITT, molekulová hmotnost, distribuce molekulových délek,...)
- technologické parametry (teplota, tlak, smyková rychlost, čas)
- geometrie a materiál trysky (tvar tokového kanálu, materiál trysky, drsnost povrchu, délka kanálu,...)

Avšak největší komplikace tyto průvodní jevy (narůstání průměru, narůstání tloušťky stěny a protahování) způsobují tím, že působí současně a dokonce se vzájemně ovlivňují. Tím je možnost jakékoliv předpovědi tvaru a rozměrů parizonu (pro určitou vytlačovací hlavu) záležitostí značně složitou a dosud neexistuje spolehlivá metoda, která by na základě známých reologických vlastností umožňovala s dostatečnou přesností předpovědět tyto geometrické změny. Proto se používají metody empirické, například pořizování videozáznamů délky parizonu v závislosti na čase.

### **2.5.2 Viskoelastické chování polymerů [1]**

Viskoelastická je jednou z charakteristických vlastností polymerů. Je to vlastnost, která popisuje deformační chování materiálu. Obecně lze deformační chování prezentovat na dvou mezních případech:

- ideálně pružné těleso
- ideálně viskózní kapalina

U ideálně pružného tělesa platí Hookův zákon, což znamená, že velikost deformace je přímo úměrná velikosti napětí. Deformace se ustaví okamžitě, jakmile začne působit vnější napětí a v průběhu času se dále nemění. Přičemž veškerá práce vynaložená na deformaci tělesa se v něm akumuluje jako potenciální energie a lze ji kvantitativně získat zpět po zrušení vnějšího napětí.

U ideálně viskózní kapaliny dochází působením vnějšího napětí k toku. Rovnováha mezi napětím a deformací se neustaví a deformace narůstá po celou dobu působení napětí. To znamená, že deformace je závislá nejen na velikosti napětí, ale i na době jeho působení. Jedná se o zcela nevratnou deformaci. Veškerá práce vynaložená na deformaci se přeměňuje na kinetickou energii pohybujících se částic a nakonec v teplo.

Deformační chování u polymerů je však komplikovanější kvůli jejich složitější struktuře. Celková deformace se dá u polymerů rozdělit do tří částí:

- deformace elastická
- deformace plastická (viskózní tok)
- deformace zpožděně elastická

Deformace zpožděně elastická je stejně jako deformace plastická (viskózní tok) závislá na době působení vnějšího zatížení a proto i celková deformace polymerních materiálů je časově závislá. Celková deformace je pak rovna součtu deformací jednotlivých členů.

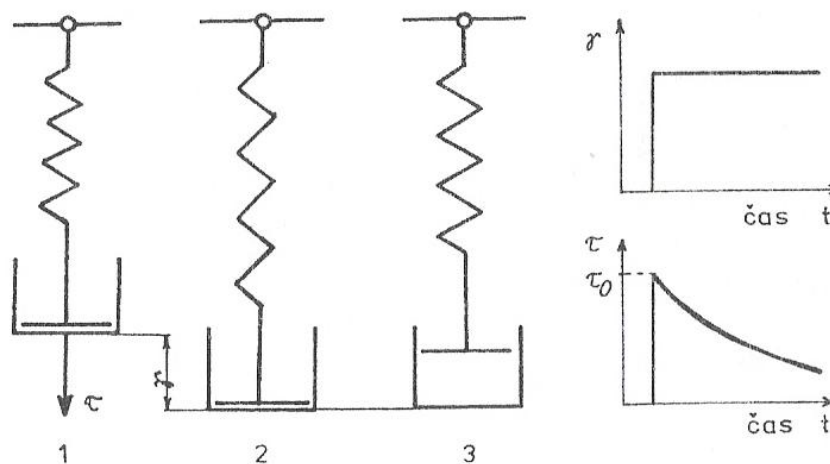
Narůstání deformace při působení napětí i její uvolnění po odlehčení závisí na podílu dynamické viskozity a modulu pružnosti ve smyku. Tento podíl má rozměr času a nazývá se relaxační doba. Je to doba, kterou potřebují makromolekuly k tomu, aby pootočením svých segmentů zaujaly novou rovnovážnou konformaci při změně vnějšího napětí. Její hodnota závisí na teplotě, při neměnné teplotě je to konstanta. Takto popsané časově závislé deformační procesy se označují jako relaxace (retardace) deformace.

Rozhodujícími vlivy na viskoelastické chování polymeru jsou zejména teplota a rychlost deformace. Například vliv rychlosti deformace lze předpovídat takto: Působí-li síla po velice krátkou dobu (například rázové namáhání), kapalina ve válcích klade takový odpor proti posuvu pístu, že tyto viskózní složky se ve výsledné deformaci téměř neuplatní a výsledná deformace bude prakticky odpovídat pouze deformaci pružné. Naopak při působení sil po velmi dlouhou dobu mají viskózní členy dost času, aby se jejich deformace plně rozvinuly, ve výsledné deformaci obě tyto složky

mohou převládnout. Jedním z nejnápadnějších projevů elasticity je právě narůstání (nadouvání) při extruzi.

Také teplota významným způsobem ovlivňuje viskoelastické chování polymeru a její účinek by se dal shrnout takto: Jestliže je teplota zatěžovaného polymeru mnohem nižší než teplota zesklenní, chová se hmota jako dokonale pružné těleso, poněvadž je viskozita u viskózních členů tak vysoká, že se tyto členy při deformaci nemohou uplatnit. Se vzrůstající teplotou se začne projevovat také vliv zpožděné elastické deformace a deformace plastické. Podíl nevratné deformace z celkové deformace bude vzrůstat a naopak podíl elastické (vratné) deformace bude klesat. Při neustálém zvyšování teploty do oblasti teplot nad teplotou viskózního toku klesne i podíl zpožděné elastické deformace a uplatní se pouze vliv viskózního členu. Dalo by se říci, že by se v tomto případě tavenina přibližovala ideální kapalině, avšak je známé, že taveniny makromolekulárních látek se nikdy nechovají jako Newtonovské kapaliny. Dříve než by tohoto stavu mohli dosáhnout, dojde k jejich tepelné degradaci.

Další důležitou vlastností viskoelastických látek je relaxace napětí. Relaxace napětí je samovolné uvolňování napětí v tělese, které bylo deformováno na konstantní hodnotu deformace. Napětí v plastu vykazuje časovou závislost a čas, ve kterém dosáhne napětí 37% původní hodnoty, se nazývá relaxační doba. Relaxace se znázorňuje Maxwellovým modelem (obr. 2.10).



Obr. 2.10: Maxwellův model pro znázornění relaxace napětí [1]



### 2.5.3 Reologie tavenin polymeru [1], [13]

Reologické chování taveniny hraje důležitou roli při prakticky všech technologiích zpracování taveniny plastů. Reologie popisuje závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí, a protože smyková rychlost přímo ovlivňuje viskozitu taveniny, má tak na její tokové chování zásadní vliv.

Z níže uvedeného obrázku (obr. 2.11) je patrný rozdíl mezi chováním Newtonovských a nenewtonovských kapalin. Taveniny polymerů patří do nenewtonovských kapalin a jejich viskozita je tudíž závislá na velikosti smykové rychlosti. Tato závislost se dá rozdělit do tří oblastí:

I. Oblast maximální newtonovské viskozity

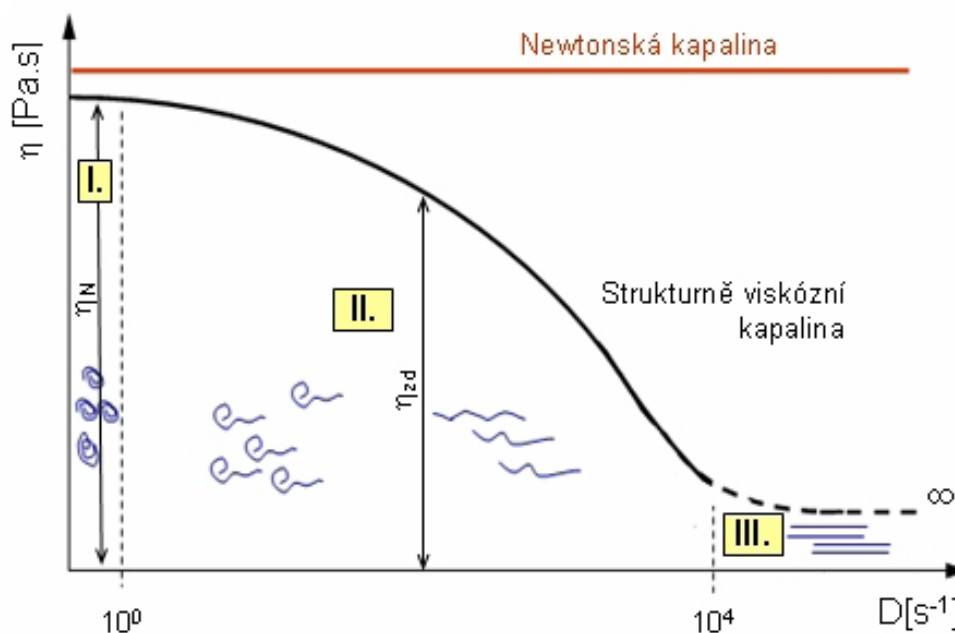
Při nízkých smykových rychlostech lze považovat viskozitu za konstantní rovnou max. newtonovské viskozitě. Makromolekuly mají tvar volně sbalených klubíček, což odpovídá maximální entropii systému.

II. Oblast strukturní viskozity

V této oblasti dochází zvyšováním smykové rychlosti k poklesu viskozity. Taková viskozita je označována jako zdánlivá. Pokles viskozity je způsoben rozbalováním klubíček makromolekul ve směru toku což způsobuje jejich snadnější pohyb při toku.

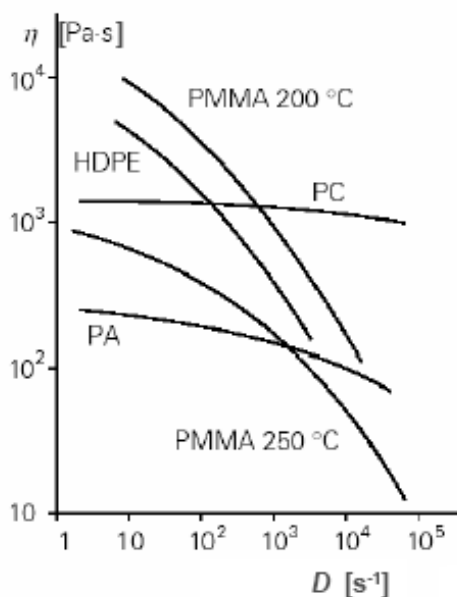
III. Oblast nekonečného smyku

Tato oblast odpovídá extrémním smykovým rychlostem, v nichž se viskozita stává opět na této rychlosti nezávislou. Tato viskozita je označována jako viskozita při nekonečném smyku a odpovídá stavu zcela rozbalených klubíček makromolekul. Tohoto stavu však v praxi nelze dosáhnout.



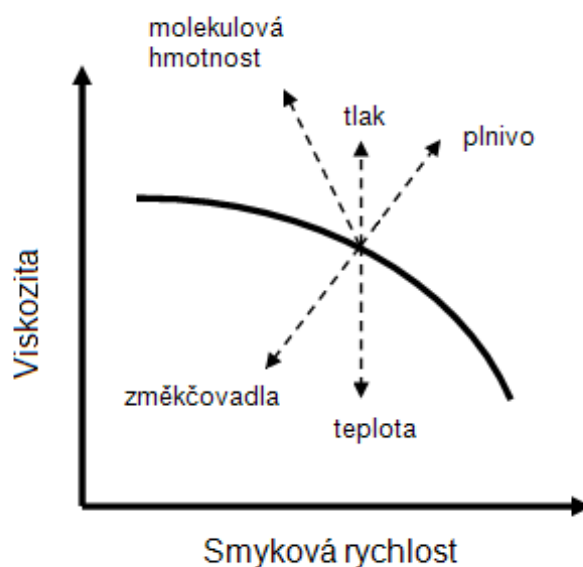
Obr. 2.11: Závislost dynamické viskozity tavenin na smykové rychlosti [13]

Z hlediska praxe je důležité, že veškeré zpracovatelské technologie leží v oblasti strukturní viskozity čili v oblasti středních smykových rychlostí. Stejně tak technologie vyfukování je reologickým chováním taveniny ovlivňována a to zejména v té části procesu, kde dochází k tvorbě polotovaru (vytlačování parizonu). Citlivost taveniny na smyk je však u každého materiálu jiná (obr. 2.12) a má vztah k formovatelnosti (schopnosti deformace) a také k výkonovým parametrům technologie vyfukování. Ve vytlačovacím stroji při střední smykové rychlosti, je tavenina, jak už bylo řečeno, středně viskózní. Když je dále protlačována vysokou rychlostí úzkou štěrbinou vytlačovací hlavy, její smyková rychlost se zvýší a nastane pokles viskozity. V další fázi procesu visí tavenina ve formě parizonu pod hlavou a nepůsobí tak na ni žádný smyk, tavenina se proto jeví jako vysoce viskózní.



Obr. 2.12: Příklady závislosti dynamické viskozity tavenin na smykové rychlosti rozdílných materiálů [13]

Výše uvedené závislosti viskozity tavenin na smykové rychlosti jsou uvažovány za předpokladu konstantní teploty. Avšak i teplota má pochopitelně rozhodující vliv na viskozitu. Tak jako u všech polymerních materiálů, má zvýšení teploty za následek snížení viskozity, zatímco zvýšení tlaku má opačný účinek. Další faktory ovlivňující viskozitu jsou znázorněny na obr. 2.13.



Obr. 2.13: Vliv vybraných faktorů na viskozitu polymeru [8]

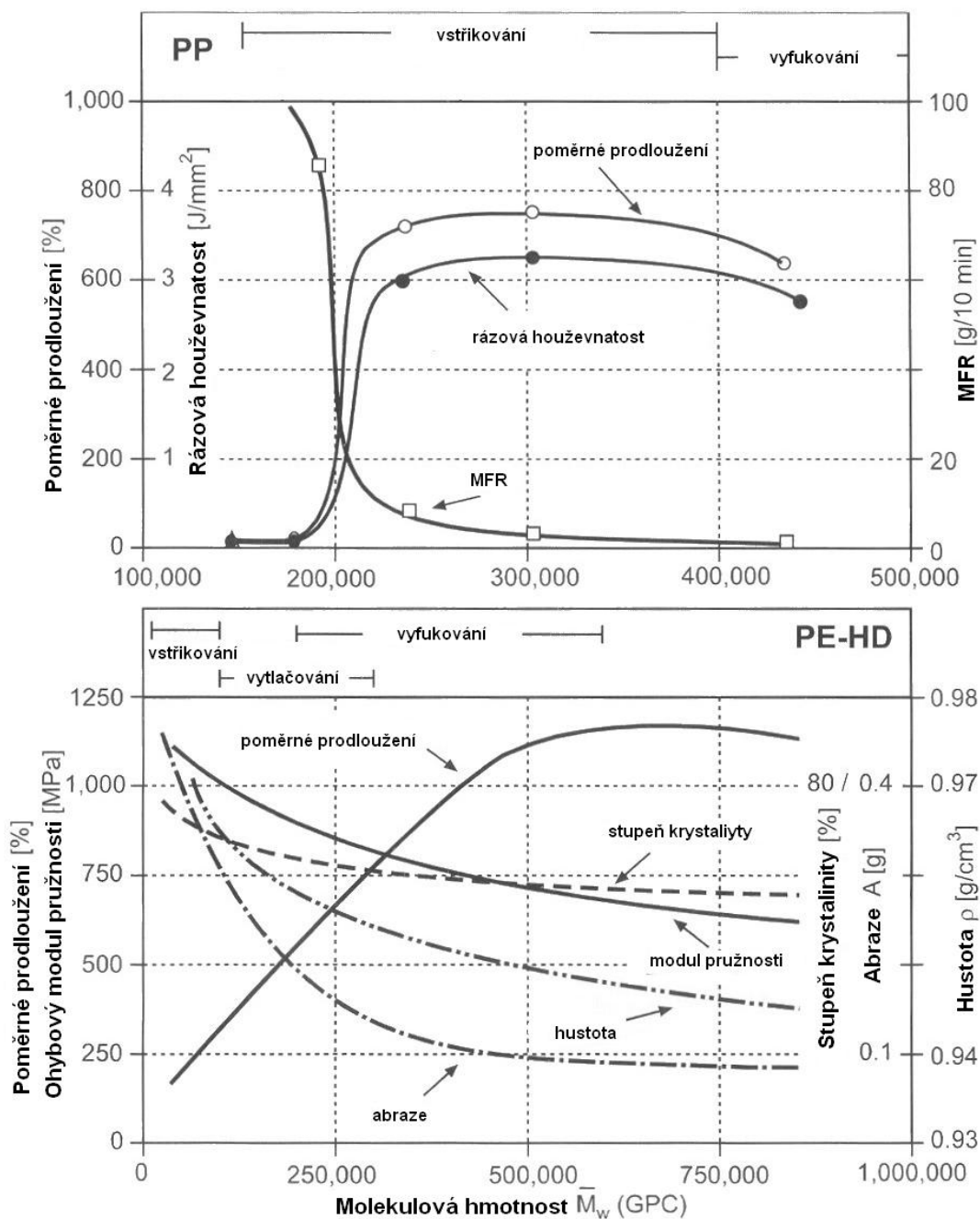
#### 2.5.4 Vliv materiálu na narůstání parizonu [8], [9]

Výběr materiálu má na narůstání (průměru a tloušťky stěny) a protahování parizonu zásadní vliv. Tak jak se jednotlivé materiály od sebe liší svými vlastnostmi, tak se liší i jejich míra narůstání a protahování. V průmyslové praxi se ve většině případů extruzního vyfukování používají polyolefiny a to zejména polyetylén a polypropylén. Důvodů rozdílného narůstání rozdílných materiálů je více. Jsou způsobeny například rozdílnou hustotou, molekulovou hmotností, velikostí intermolekulárních sil, atd. Liší se nejen narůstání a protahování dvou rozdílných materiálů, ale do určité míry se může lišit i narůstání u dvou stejných materiálů, například dvou polyetylénů. Z toho vyplývá, že na narůstání nemá vliv pouze chemické složení plastu, ale i molekulární struktura (tvar makromolekul) a distribuce molekulových hmotností (dále jen DMH).

Hustota plastů je dána jejich chemickým složením, a protože jejich základem jsou látky s nízkou atomovou hmotností (konkrétně uhlík a vodík), což způsobuje mimo jiné i menší intermolekulární síly, je jejich hustota nízká. Nejmenší hustotu vykazují právě u vyfukování hojně používané polyolefiny, konkrétně pak PE a PP. Hustota polymeru vzroste zabudováním atomů o vyšší atomové hmotnosti do makromolekuly. Takovými prvky může být například chlór (např. u PVC). Hustotu mohou ovlivnit i aditiva přidaná do polymerní matrice, a podle hustoty samotného aditiva mohou výslednou hustotu plastu zvýšit nebo snížit.

Molekulová hmotnost je součtem hmotností jednotlivých atomů obsažených v molekule. Také je měřítkem velikosti (délky) makromolekulárního řetězce, protože podíl celkové molekulové hmotnosti ku molekulové hmotnosti strukturní jednotky udává polymerační stupeň. Růst molekulové hmotnosti způsobuje změny vlastností plastu (obr. 2.14). Zvyšují se tak mechanické vlastnosti jako například mez pevnosti, zvyšuje se odolnost proti abrazi, chemická odolnost, tvrdost, snižuje se křehkost a zvyšuje se viskozita taveniny. Na druhou stranu se snižuje index toku taveniny (ITT) a schopnost tavení. Odpovídající molekulová hmotnost je základním předpokladem dosažení očekávaných vlastností plastů. Rozdíly

molekulové hmotnosti vstupního materiálu (granulátu) způsobují velké změny vlastností konečného výrobku.



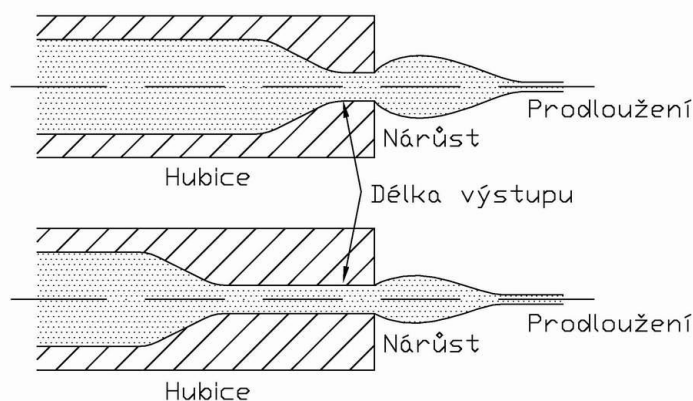
Obr. 2.14: Vliv molekulové hmotnosti na vybrané vlastnosti u PP a HDPE [10]

S rostoucím průtokem se narůstání zvětšuje v důsledku větší míry orientace makromolekul ve vytlačovací hlavě. Tato orientace je silně ovlivněna tvarem makromolekul a zejména pak jejím rozvětvením a distribucí

molekulových hmotností (DMH). U plastů s lineárními molekulami má rozšíření DMH za následek větší narůstání. Avšak plasty které mají podobné hodnoty DMH mohou mít značně odlišné narůstání. To může souviset s faktem, že narůstání je velmi citlivé na přítomnost malých, analytickými metodami nezjistitelných množství materiálů s vysokou molekulovou hmotností. Silně rozvětvené plasty mají větší sklon k narůstání, ale není možno tento závěr generalizovat, když se mění rozvětvení i DMH.

### 2.5.5 Vliv geometrie trysky na narůstání parizonu [1], [8]. [9]

Narůstání průměru a tloušťky stěny parizonu je proces elastické relaxace způsobené orientací molekul, který nastává v místě výstupu z vytlačovací hlavy. Tok na vstupu do hlavy, kde se proudnice rychle sbíhají, působí ve směru toku značné napětí, které způsobuje intenzivní orientaci molekul a pokud by tryska byla velmi krátká, bylo by narůstání zvláště intenzivní. Pokud za výstupním otvorem následuje dlouhá přímá sekce, uskuteční se proces molekulární relaxace vedoucí k destrukci orientace, k níž došlo ve vstupu. Jestliže je tedy hlava delší, míra narůstání bude menší (obr. 2.15). Také ve velmi dlouhé štěrbině stále zůstává výrazné narůstání způsobené působením smyku, které způsobuje určitou axiální orientaci.

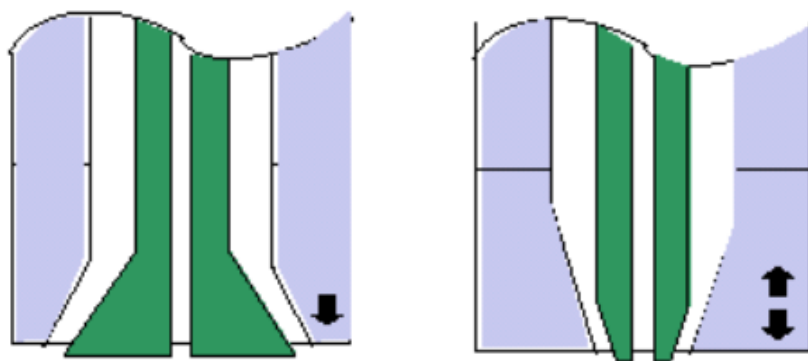


Obr. 2.15: Vliv tvaru trysky na tvar vytlačovaného výrobku [8]

Pokud jsou součástí vytlačovací hlavy nějaké rozšířené či zúžené části, působí v nich napětí, které způsobuje určitou orientaci. Směr orientace

pak závisí na detailní konstrukci tokových kanálů. Zejména pak na dvou geometrických parametrech, a to úhlem rozbíhavosti (v případě hubice typu „A“) nebo úhlem sbíhavosti (v případě hubice typu „V“), který svírá vnější stěna hubice podél tokové cesty (obr. 2.16). To způsobuje napínání taveniny v tangenciálním směru, což by mělo zmenšit narůstání průměru tím, že působí proti axiální orientaci vznikající v důsledku smykového toku.

Při konstrukčních návrzích vytlačovacích hubic je tedy nutné přihlížet k vlivu navrhované geometrie na narůstání taveniny. Protože vhodnou geometrií vytlačovací hubice lze narůstání do určité míry eliminovat.



Obr. 2.16: Typy trysek (vlevo typ A, vpravo typ V) [14]

### 2.5.6 Vliv technologických parametrů na narůstání parizonu

[8], [9]

Nastavení technologických parametrů vždy závisí na několika faktorech výrobního procesu extruzního vyfukování, například na druhu použitého materiálu, na velikosti výrobku, na délce pracovního cyklu, atd.

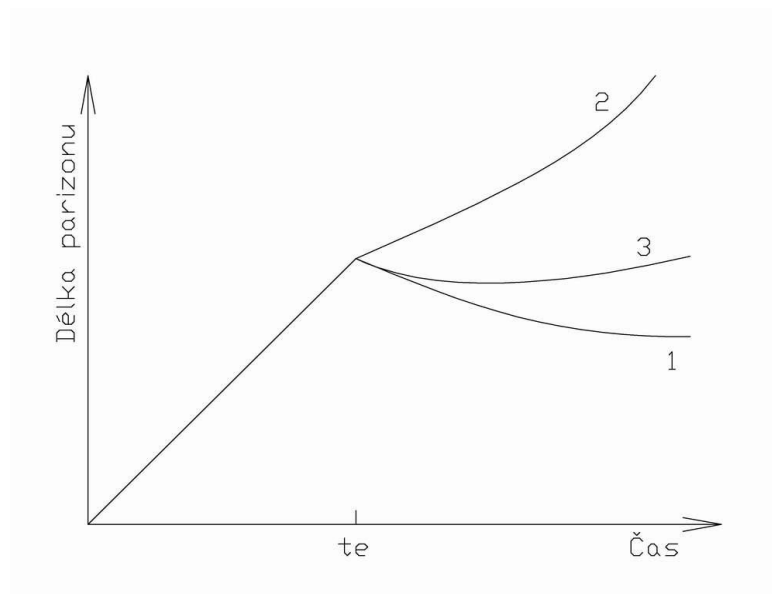
Teplota vždy závisí na použitém materiálu. Výrobce udává pásmo doporučených zpracovatelských teplot. Například pro HDPE jsou to teploty okolo 170°C, na rozdíl od PP kde je pásmo zpracovatelských teplot okolo 200°C. Vliv teploty na narůstání parizonu je takový, že s klesající teplotou se narůstání s určitým zpožděním zvětšuje. Teplota má velký vliv i na jeho protahování, protože čím vyšší teplotu parizon má, tím snáze se protahuje. Příliš vysoká teplota pak může vést k nekontrolovanému protahování, což

způsobí destabilizaci celého procesu. Protože čas, po který je vytlačovaný parizon vystaven chladnutí od okolního vzduchu před uzavřením formy, je spíše kratší, nedochází k velkému poklesu teploty (většinou méně než 5°C), tudíž je vytlačování parizonu pokládáno za izotermní proces.

Jak už bylo zmíněno, zvětšování objemu taveniny, čili narůstání průměru a tloušťky stěny parizonu, je způsobeno viskoelasticitou taveniny polymeru. Taveniny termoplastů jsou značně stlačitelné a elastické zvětšování rozměrů představuje určitou energii, kterou je nutné tavenině dodat prostřednictvím vytlačovacího tlaku. Z toho vyplývá, že narůstání závisí na tlaku, kterým je tavenina hubicí vytlačována. Celkový tlak je tedy spotřebován jednak na vlastní viskózní tok taveniny kapilárou tj. na vytvoření rychlostního profilu v kapiláře a s tím spojené překonávání viskózních odporů, které se vlivem tření později změní v teplo a také na překonávání elastického odporu taveniny při jejím vtlačování do kapiláry a na její vytlačování z kapiláry, což se projevuje jako kinetická energie vytékající taveniny. To vše je příčinou toho, že k dosažení určité objemové průtokové rychlosti je potřeba vynaložit větší množství práce, což znamená působit větším tlakem, než jaký by odpovídal samotnému viskóznímu toku v hubici.

S viskoelasticitou materiálu souvisí i časová závislost průvodních jevů narůstání a protahování parizonu. Například u HDPE při 170°C nastává 70 až 80% narůstání v průběhu prvních 5 sekund po opuštění hubice a zbytek proběhne do 3 minut. Oproti tomu u PP o teplotě 190°C se v prvních okamžicích projeví jen 50% narůstání a k dokončení tohoto jevu by bylo dosaženo za dobu delší než 10 minut. Čas je důležitý také u protahování parizonu. V tomto případě se dá říci, že čím delší dobu bude parizon vytlačován před samotným vyfouknutím ve formě, tím déle bude probíhat jeho samovolné protahování a výsledné protažení a ztenčení stěny bude větší.





Obr. 2.17: Závislost délky parizonu na čase [8]

Na obr. 2.17 jsou křivky závislosti délky parizonu na čase pro různé případy. První část křivky odpovídá fázi vytlačování parizonu. Když se vytlačování zastaví, je délka předlisku závislá jen na jeho narůstání a protahování. Křivka 1 odpovídá stavu, ve kterém probíhá pouze narůstání bez jakéhokoliv protahování. Křivka 2 odpovídá případu, kdy naopak dochází pouze k protahování. Křivka 3 znázorňuje chování skutečného parizonu. V tomto případě nastane počáteční zkrácení následované pomalým prodloužením, což odpovídá složité časové závislosti narůstání.

Dalším faktorem, který má vliv na narůstání za hubicí je smyková rychlost. Bylo zjištěno, že narůstání vzrůstá se smykovou rychlostí až ke kritické smykové rychlosti. Nad touto kritickou smykovou rychlostí začíná narůstání klesat.

### 2.5.7 Následky narůstání a protahování parizonu [8], [9]

Narůstání (průměru a tloušťky stěny) a protahování parizonu má významný vliv na kvalitu vyfukovaného dílu. Tyto děje přímo ovlivňují tloušťku stěny parizonu a tím pádem i tloušťku stěny vyfukovaného výrobku (obr. 2.8). Tloušťka stěny pak rozhoduje o použitelnosti výrobku, protože má velký vliv na tak důležité vlastnosti, jakými jsou například pevnost, tuhost a

propustnost plynů. Při příliš malém zvětšení průměru mohou být výrobky nesouměrné a neúplné. Oproti tomu, při velkém zvětšení průměru se může polymer zachytit ve formě a vytvořit tak záhyby.

Tvorba záhybů, zřasení či zvrásnění je možné hodnotit jako borcení parizonu. To nastává v okamžiku, kdy v horní části není tavenina schopna odolávat tangenciálnímu napětí od vlastní tíhy. Tvorba těchto záhybů je nežádoucí, protože může způsobit zřasení finálního výrobku. K tvorbě záhybů pravděpodobně nejvíce přispívá extrémní narůstání průměru parizonu a úzká štěrbina na výstupu z hlavy. Na tvorbu záhybů má negativní vliv i zvýšená teplota. Tavenina vytékající z hubice může mít také povrchové nepravidelnosti (povrchové vady), které mohou zhoršit kvalitu povrchu finálního vyfouknutého tělesa. Tento efekt se projevuje nad kritickým smykovým napětím, což rychlost vyfukovacího procesu omezuje. Borcení parizonu se nejčastěji vyskytuje u vysokoviskózních plastů s úzkou distribucí molekulových hmotností.

### **2.5.8 Možnosti eliminace narůstání a protahování parizonu**

[4], [10]

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že velikost narůstání nejvíce závisí na druhu použitého plastu a na technologických podmínkách, hlavně na tlaku a teplotě. Například u polyetylenu, který se k vyfukování používá nejvíce, může tento nárůst parizonu činit někdy až dvojnásobek oproti rozměrům hubice. Avšak nejen vhodnou volbou materiálu a změnou technologických parametrů procesu lze narůstání a tím tedy i tloušťku stěny ovlivnit. U současných moderních vyfukovacích strojů (obr. 2.2) lze řídit tloušťku stěny v závislosti na jeho délce. Tloušťka parizonu se nastavuje axiálním pohybem trnu v hubici, nebo naopak pohybem hubice při konstantní poloze trnu (řízeno mikroprocesorem). Další možností je také přitlačování prstenců v hubici na parizon, čímž dochází ke změně tloušťky. Při stanovení štěrby mezi trnem a hubicí je tedy nutné s narůstáním objemu taveniny počítat.

Elektronicky řízeným systémem regulace tloušťky stěny je možné ovlivňovat tloušťku stěny parizonu v jeho jednotlivých částech, tak jak je to nutné pro zachování rovnoměrného rozložení materiálu ve výrobku. Regulace se skládá z elektronické jednotky, která je propojena s mechanickými částmi řízení – vytlačovací trn, držák trnu, hubice. To umožňuje regulovat tloušťku stěny parizonu v 12 – 250 bodech (dle instalovaného řízení), a to zvětšováním a zmenšováním mezery mezi vytlačovacím trnem a hubicí. Nevýhodou je, že po celém obvodu průřezu parizonu je tloušťka stěny stejná. Parizon je tedy možné regulovat pouze ve vertikálním směru. Pro regulaci stěny v průřezu je při použití tohoto řízení nutné profilovat vytlačovací trn. Zde však dochází k zesílení tloušťky stěny po celé délce parizonu. Při výrobě tvarově komplikovanějších výrobků se proto používá systém PWDS, který pomocí pístnic deformujících kroužek umožňuje regulaci tloušťky stěny v horizontálním i vertikálním směru. PWDS zajišťuje zabezpečení minimální tloušťky stěny, aniž by v ostatních oblastech došlo k jejímu extrémnímu nárůstu.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Hlavním cílem experimentální části byla monitorizace rozměrových změn vytlačovaného parizonu (obr 3.1), zejména pak sledování narůstání průměru parizonu, sledování vlivu technologických parametrů a eliminace narůstání v důsledku gravitační síly. Pro experiment byly zvoleny základní materiály používané při výrobě dutých těles technologií extruzního vyfukování. Vyfukovací stroj byl upraven tak, aby bylo možno co nejlépe sledovat rozměrové změny vytlačovaného parizonu. K záznamu sledovaných jevů byl použit systém ARAMIS.

Vytlačování parizonu bylo prováděno na stroji GM 251 od společnosti GDK spol. s.r.o. Karlovy Vary a to při otáčkách šneku 30 ot/min, 60 ot/min a 90 ot/min. Veškeré záznamy profilů parizonů byly vyhodnoceny a zpracovány v grafické podobě.

K rozboru vlivu použitého materiálu a vybraných technologických parametrů byla použita regresní analýza.



*Obr. 3.1: Snímek sledovaného parizonu*

### 3.1 Výběr materiálů [15], [16]

Pro experiment byly vybrány čtyři základní materiály, které jsou běžně používané na výrobu dutých těles technologií extruzního vyfukování. Materiály byly zvoleny tak, aby svými vlastnostmi z velké části pokryly oblast vlastností běžně používaných materiálů. Byly tedy vybrány materiály:

- PE Liten BB – 29
- PE Bralen RB 2-62
- PP Mosten GB 005
- PP Tiplen R 659

**PE LITEN BB 29**, od výrobce Unipetrol RPA Litvínov, je vysokohustotní kopolymer polyetylénu, určený pro zpracování vyfukováním a vytlačováním. Je velmi dobře zpracovatelný, vykazuje dobrou houževnatost, tuhost a odolnost vůči tenzoaktivním látkám. Je vhodný pro výrobu dutých předmětů do objemu 120 litru, jako jsou lahve, kanystry, sudy, trubky pro beztlaké aplikace, apod.

Tab. 3.1: Základní vlastnosti materiálu PE Liten BB – 29

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT ( 190/ 2,16 )	g/10 min	0,15	ISO 1133
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	950	ISO 1183
Napětí na mezi kluzu	MPa	25	ISO 527
Ohybový modul	MPa	1050	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	12	ISO 179
Teplota měknutí dle Vicata	°C	125	ISO 306
Tvrdost Shore D	-	60	ISO 868

**PE BRALEN RB 2-62**, od výrobce Slovnaft Petrochemicals, s.r.o. Bratislava, je nízkohustotní polyetylén bez aditiv, určený pro vyfukování malých nádob (do 2000 ml), vytlačování desek a profilů. Je vhodný též na vstřikování a napěňování. Doporučené zpracovatelské teploty jsou v rozmezí 150 až 165°C.

Tab. 3.2: Základní vlastnosti materiálu PE Bralen RB 2-62

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT ( 190/ 2,16 )	g/10 min	2	ISO 1133
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	918	ISO 1183-2
Napětí v tahu při přetrhnutí	MPa	12	ISO 527-1,2
Teplota měknutí dle Vicata	°C	95	ISO 306
Tvrdost Shore D	-	46	ISO 868

**PP MOSTEN GB 005**, od výrobce Unipetrol RPA Litvínov, je homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností pro víceúčelové použití. Je vhodný pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, provazů, motouzů a k výrobě fólií pro následné tvarování.

Tab. 3.3: Základní vlastnosti materiálu PP Mosten GB 005

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT ( 230/ 2,16 )	g/10 min	5	ISO 1133
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	-	ISO 1183
Napětí na mezi kluzu	MPa	34	ISO 527
Ohybový modul	MPa	1550	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	4	ISO 179
Teplota měknutí dle Vicata	°C	157	ISO 306

**PP TIPLÉN R 659**, od výrobce TVK Plc. Polymer Business Unit, Hungary, je statický kopolymer vhodný pro extruzní vyfukování a vstřikování. Obsahuje nukleační činidlo a vyznačuje se vysokou transparentností a leskem. Doporučené zpracovatelské teploty jsou 185 až 230°C.

Tab. 3.4: Základní vlastnosti materiálu PP Tiplen R 659

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT ( 230/ 2,16 )	g/10 min	2	ISO 1133
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	-	ISO 1183-2
Napětí v tahu při přetrhnutí	MPa	29	ISO 527-1,2
Ohybový modul	MPa	950	ISO 178
Vrubová houževnatost Izod 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	24	
Tvrdost Rockwell	stupnice R	78	ISO 2039/2

### 3.2 Parametry vyfukovacího stroje GM 251 [3], [4], [17]

Vyfukovací stroj GM 251 (obr. 3.2), od společnosti GDK spol. s r.o. Karlovy Vary, je určen pro výrobu dutých těles z plastů metodou výtlačného vyfukování. Jedná se o vyfukovací stroj s jednonásobnou formou s příčným pojezdem vozíku forem a vyfukováním shora. Jeho konstrukce umožňuje orientovaný výstup výrobků, zbavených přetoků, případně s vyříznutým širokým hrdlem. Provoz může být s jednocestným, nebo dvoucestným provedením vytlačovací hlavy. Jmenovitý objem dutého tělesa je stanoven na 250 cm<sup>3</sup> (odvozený z maximálního průměru a délky výrobku v jednodutinové formě), přičemž je tento objem doporučen jako optimální. Stroj pracuje v režimu kontinuálního vytlačování a je určen pro zpracování termoplastických polymerů určených pro výtlačné vyfukování, zejména PE-HD, PE-LD, PP.



Obr. 3.2: Vyfukovací stroj GM 251 [5]

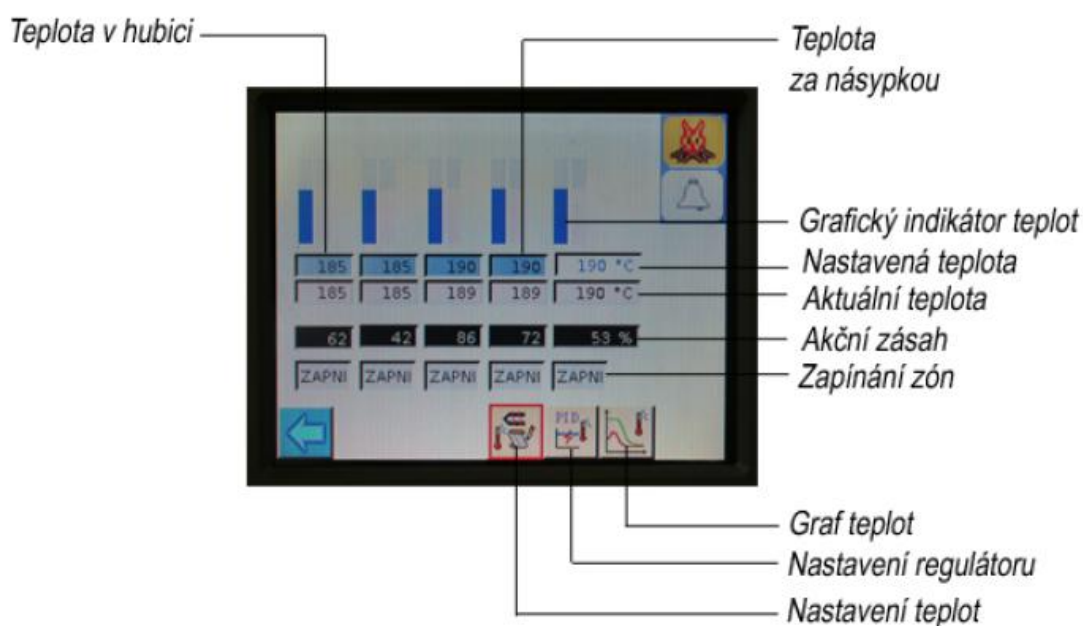
### 3.2.1 Nastavení vyfukovacího stroje GM 251 [4]

Po zapnutí hlavního vypínače a přepnutím napájení do polohy I (zapnuto) byl vyfukovací stroj GM 251 uveden do pohotovostního stavu. Dotykový displej poté zobrazil úvodní obrazovku, která umožnila přístup ke všem potřebným nastavením, stavům stroje a aktuálním časům v automatickém režimu. Dále byl spuštěn temperační okruh stroje, jehož součástí je i ochlazování prostoru pod násypkou, tak aby byla zaručena plynulá dodávka granulátu a nedocházelo k jeho předčasnému natavování. Vyfukovací forma byla z důvodu snadnějšího snímání celého parizonu ze stroje odstraněna.

Nastavením spínače topení do polohy I (zapnuto) bylo možné v zapnutém ručním režimu na obrazovce zvolit ikonu “Nastavení teplot”, čímž došlo k otevření nové obrazovky se zobrazením nastavení teplot pro jednotlivé topné zóny, aktuálních teplot a indikaci akčního zásahu do



regulované soustavy. Nastavení teploty topné zóny za násypkou bylo závislé na daném materiálu, například pro PE Liten BB – 29 činila to 190 °C a směrem k výstupu z tavicí komory měla klesající charakter (patrně z obr. 3.3), z důvodu zahřívání taveniny plastu třením o stěny komory a pohybující se šnek. Po nastavení všech teplot bylo nutné počkat na dosažení žádaných teplot vytlačovacího stroje, které trvalo několik minut.



Obr. 3.3: Nastavení teplot [3]

Stroj GDK 251 umožňuje vícepolohovou regulaci tloušťky stěny parizonu. Její nastavení je možné provést návratem na úvodní obrazovku a stisknutím ikony „Nastavení profilu“. Křivka na obrazovce zobrazuje aktivně uložený profil, podle kterého je parizon vytlačován z hubice. V našem případě však byla tloušťka stěny konstantní. Servo bylo nastaveno do trvalé polohy 82,8%.

### 3.3 Snímání profilu parizonu po celé délce

Snímání geometrických a rozměrových změn vytlačovaného parizonu probíhalo bezdotykovým způsobem (obr. 3.6), který je popsán v této kapitole.

#### 3.3.1 Popis snímacího zařízení [18], [19], [20]

K pořízení snímků byl použit měřicí systém ARAMIS od firmy GOM mbH (obr. 3.4). Jedná se o optický měřicí systém pro bezkontaktní měření deformací. Princip měření je založen na fotogrammetrické korelaci zobrazení. Tento přístroj umožňuje stanovit deformaci materiálu na základě posunutí bodů povrchu materiálu mezi nedeformovaným stavem a stavem povrchu při deformaci (téměř v libovolném počtu kroků). Systém ARAMIS je vybaven dvěma kamerami, které snímají povrch tělesa ze dvou směrů. Prováděné měření tak může probíhat ve 3D souřadnicích. Kamery jsou osazeny čipy, které dovolují snímání rychlé sekvence snímků (ARAMIS HS – High Speed). To umožňuje použití systému především pro měření velmi rychlých dějů, např. rázových zkoušek, rychlého deformačního zatěžování, ale systém lze využít i pro statické zatěžování.

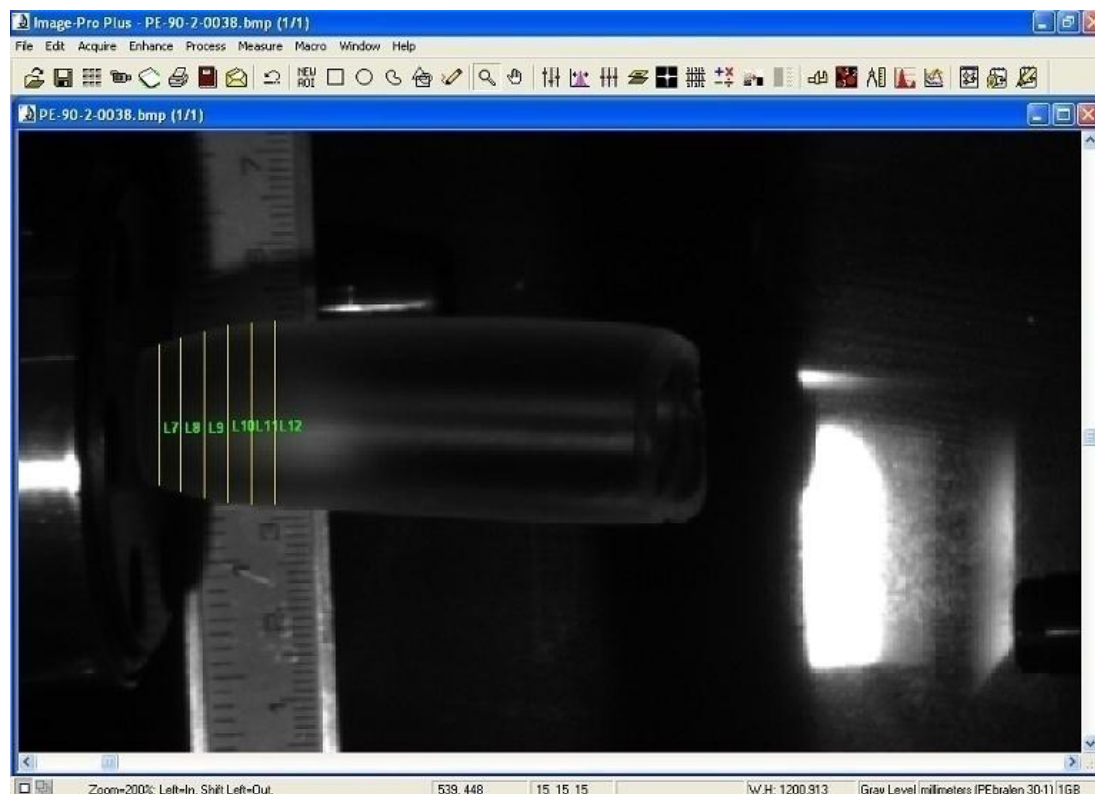
Z důvodu toho, že proces vytlačování parizonu je kontinuální a nelze zastavit a definovat tak fasety, z kterých by byly následně vypočítány 3D souřadnice těchto faset, byl v našem případě systém ARAMIS využit pouze pro záznam procesu, a tudíž mohla být použita pouze jedna z jeho kamer. S přihlédnutím k rychlosti celého děje postačovalo nastavení snímkovací frekvence 6 snímků za sekundu, přičemž jednotlivé snímky byly uvedeny ve formátu PND.



Obr. 3.4: Sestava systému ARAMIS [20]

### 3.3.2 Popis použitého software [21]

K odměřování rozměrů parizonu ze snímku, byl použit software Image-Pro Plus (verze 4.5.0.29) od firmy Media Cybernetics, Inc (obr. 3.5). Jedná se o software, který je založen na principu přiřazení rozměru pixelu (určení měřítka) na jednotlivých snímcích. Toto přiřazení je označeno jako kalibrace. Kalibrace snímku se provádí tak, že je na snímku odměřena vzdálenost, u které je rozměr předem známý. Touto kalibrací je tedy určen rozměr pixelu daného snímku. Pro přesnost odměřování je důležité, aby snímky byly pořízeny v kolmém směru na měřené rozměry. Délkový rozměr na snímku lze určit například pomocí úsečky nebo vzdálenosti dvou bodů. Lze měřit také úhly a rádiusy. Po otevření snímku a jeho kalibraci je možné odměřovat jednotlivé rozměry, které jsou automaticky zaznamenávány do tabulky. Tabulku naměřených dat lze následně exportovat do různých vyhodnocovacích softwarů, např. do Excelu.



Obr. 3.5: Uživatelské prostředí softwaru Image-Pro Plus

### 3.3.3 Postup měření

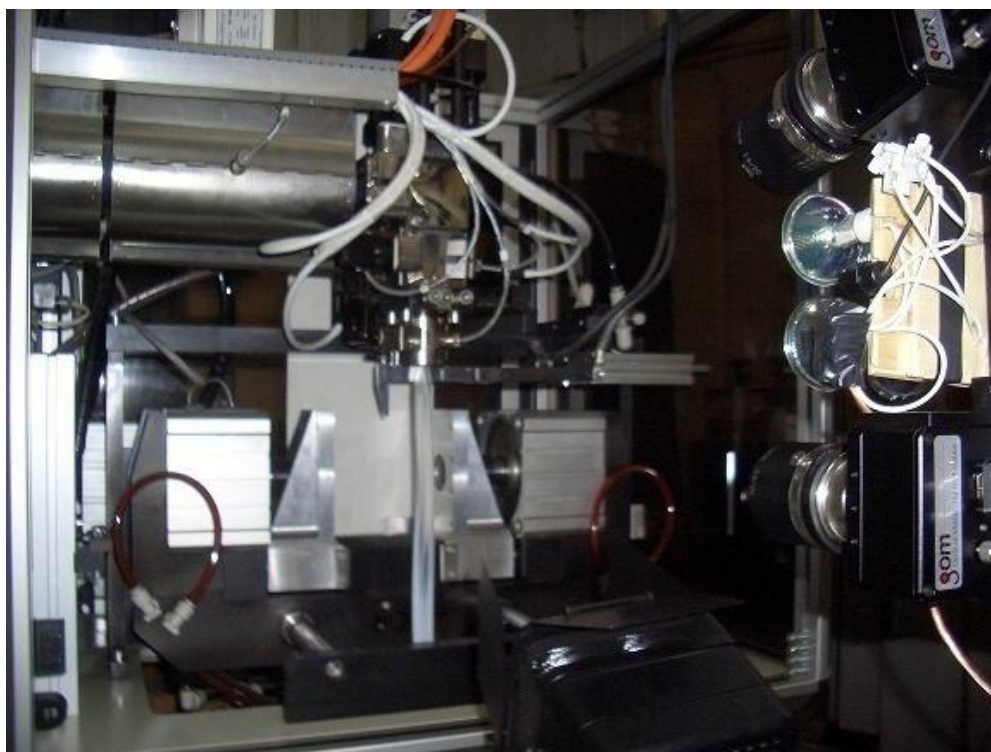
Pro daný experiment bylo stanoveno, že snímání parizonů probíhá za kontinuální extruze při otáčkách stroje (šneku) 30 ot/min, 60 ot/min a 90 ot/min. Z každé skupiny otáček byly nasnímány 3 vzorky parizonu. Před samotným snímáním bylo nutné pečlivě nastavit kameru, protože poloha kamery musí být kolmá na směr vytlačování parizonu a musí být dobře zaostřená tak, aby byla jasně viditelná hranice parizonu při následném odměřování. Dále je důležité i správné nasvícení prostoru, ve kterém je parizon vytlačován, to zajišťuje osvětlovací aparatura. Po nasnímání všech vzorků byly všechny snímky nahrány z paměti na pevný disk počítače. Protože odměřovací software Image-Pro Plus nepodporuje formát PND, který je výstupním formátem snímků u systému ARAMIS, bylo nutné nejprve provést dávkovou konverzi na podporovaný formát BMP. Tato dávková konverze snímků byla provedena pomocí softwaru IrfanView (verze 4.20).

Samotné odměřování rozměrů parizonu následně probíhalo za pomoci softwaru Image-Pro Plus. Kalibrace jednotlivých snímků byla prováděna změřením známého rozměru, k čemuž sloužila stupnice posuvného měřítka, která byla připevněna na vytlačovací hubici tak, aby byla na snímcích jasně viditelná. Nejdříve byl proměřen celý profil parizonu, což znamenalo proměření průměrů od vytlačovací hubice až po jeho konec. Parizon byl proměřen vždy při délce 210 mm, to odpovídá maximální možné délce, kterou bylo možno na snímku zobrazit. Průměr parizonu byl proměřen vždy po 2 mm. Naměřené rozměry byly poté exportovány do Excelu a z těchto dat byly pak následně vytvořeny grafické profily parizonů.

Dále byl proměřován průměr parizonu v místě 3mm a 6mm pod vytlačovací hubicí v závislosti na jeho délce. Průměry v těchto místech byly měřeny vždy po přírůstku délky parizonu o 20mm.

Podmínky měření:                      teplota  $T = 22$  [°C], relativní vlhkost  $\varphi = 55$  [%]

Datum měření:                        9.2.2009



Obr. 3.6: Snímání parizonu

### 3.4 Naměřené hodnoty

V této kapitole a na následujících obrázcích (obr. 3.7 až obr. 3.14) jsou zobrazeny a uvedeny získané hodnoty a parametry z provedených měření pro vybrané materiály (polymery) a parametry procesu.

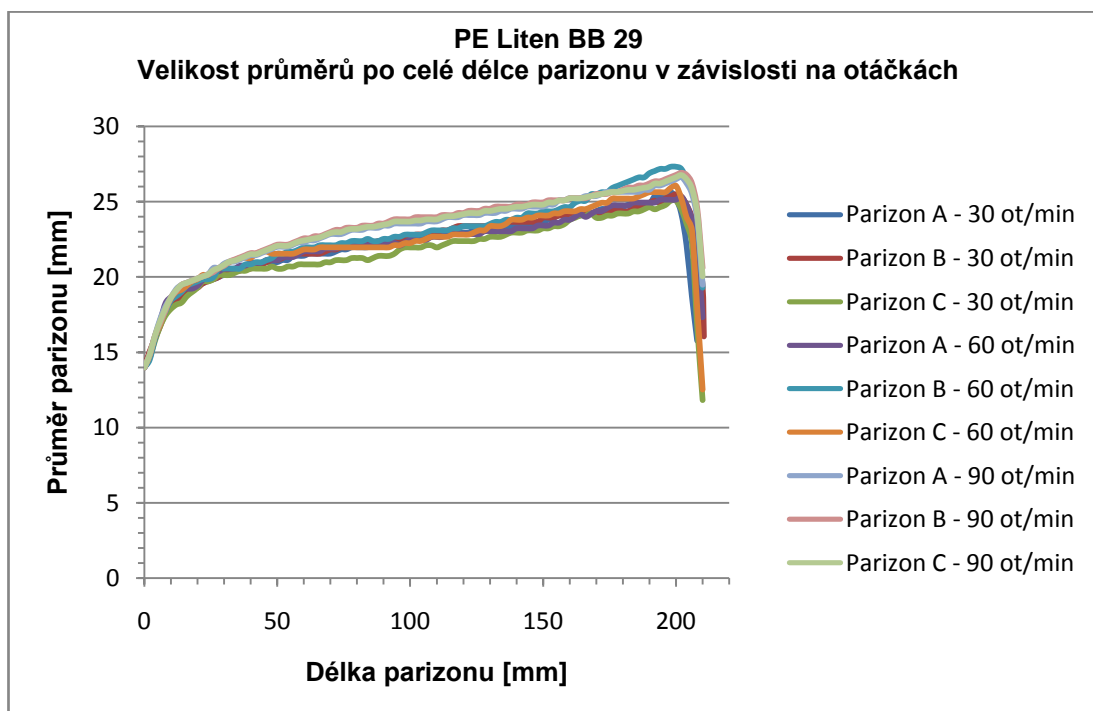
Tab. 3.5: Nastavení teplot a regulace tloušťky stěny pro jednotlivé materiály

Materiál	Teplota v jednotlivých zónách [°C]					Regulace tl. Stěny [%]
Liten BB 29	195	190	190	185	185	82,8
Bralen RB 2-62	135	135	135	135	135	82,8
Mosten GB 005	195	190	190	185	185	82,8
Tiplen R 659	195	190	190	185	185	82,8

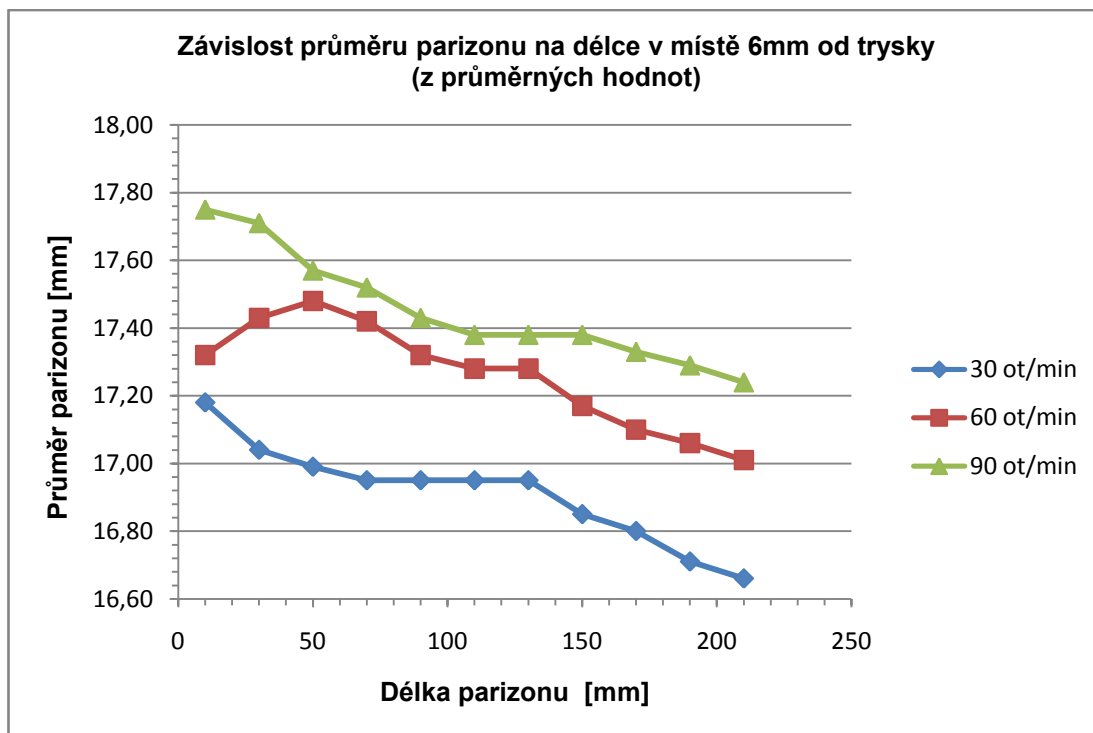
Poznámka:

U všech měření byla použita vytlačovací hubice typu „V“ o průměru 14mm a vytlačovací trn o průměru 10mm.

#### 3.4.1 Materiál polyetylén Liten BB 29

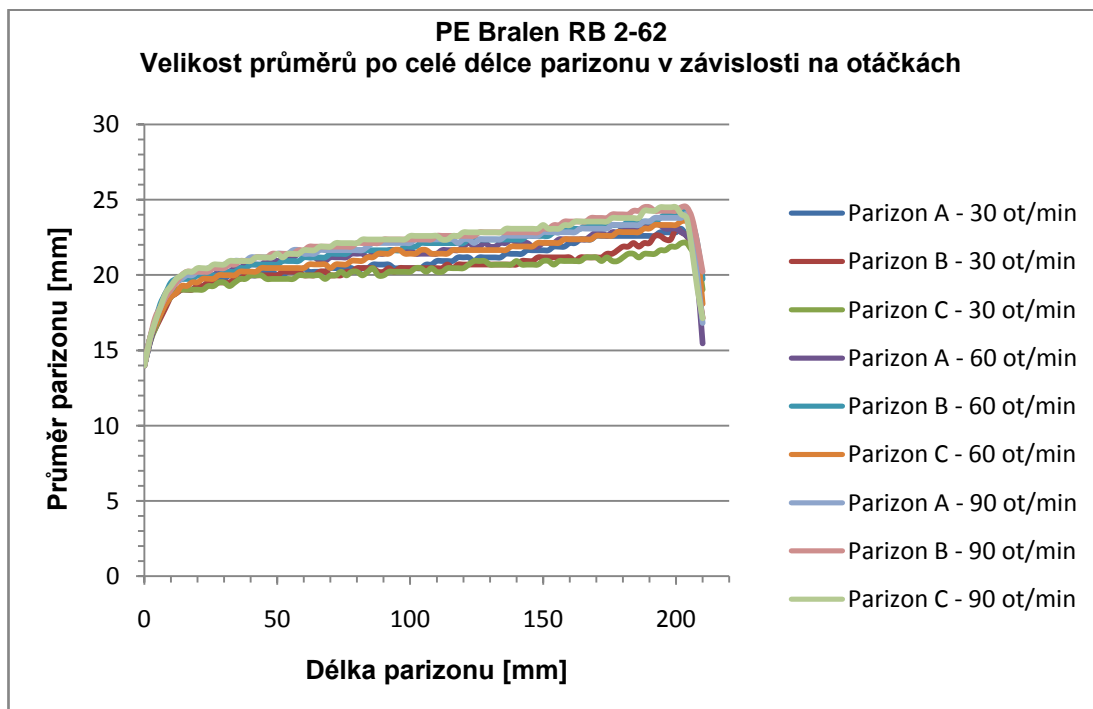


Obr. 3.7: Proměření profilů parizonů materiálu Liten BB 29



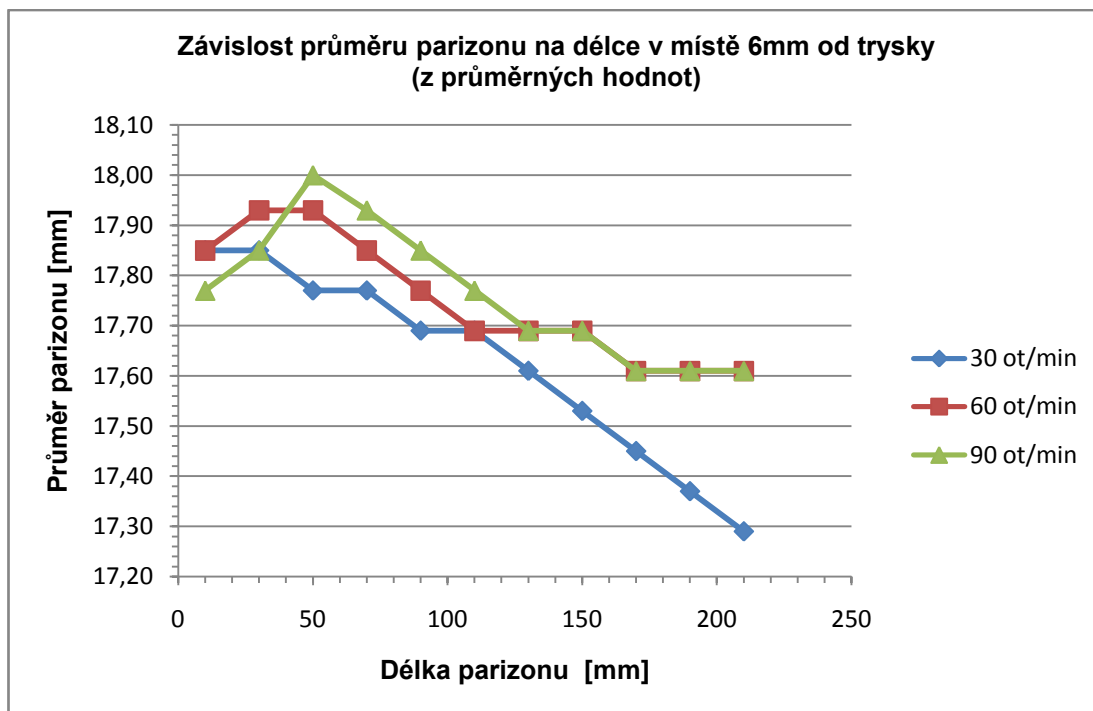
Obr. 3.8: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u materiálu Liten BB 29

### 3.4.2 Materiál polyetylén Bralen RB 2-62



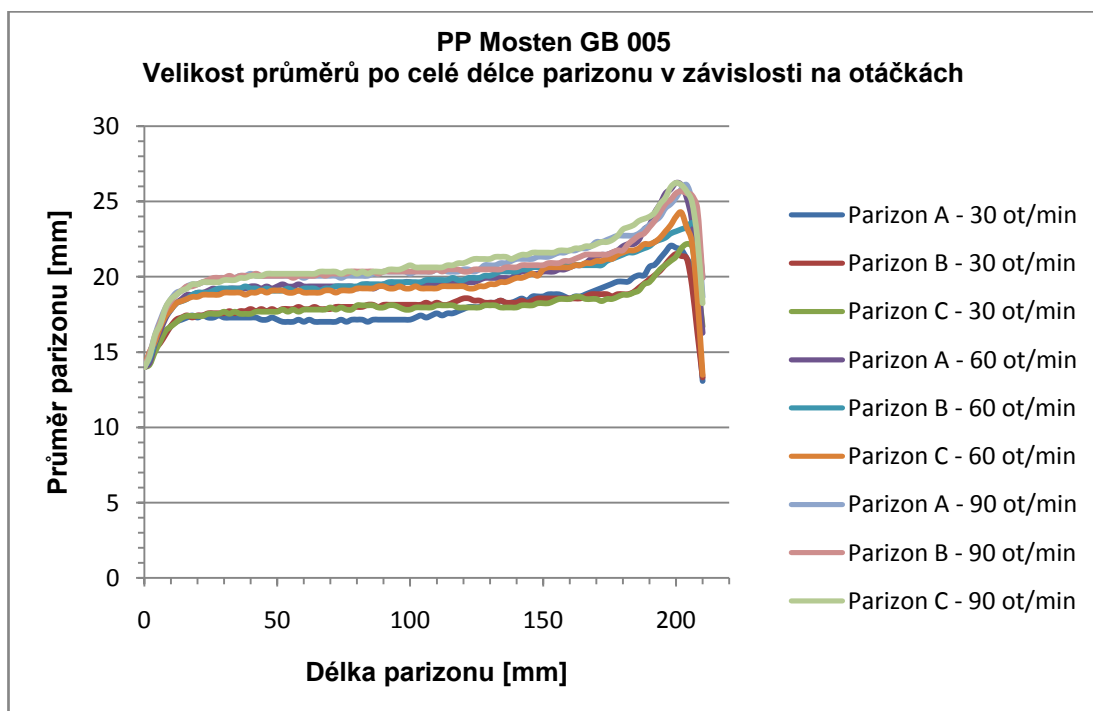
Obr. 3.9: Proměření profilů parizonů materiálu Bralen RB 2-62





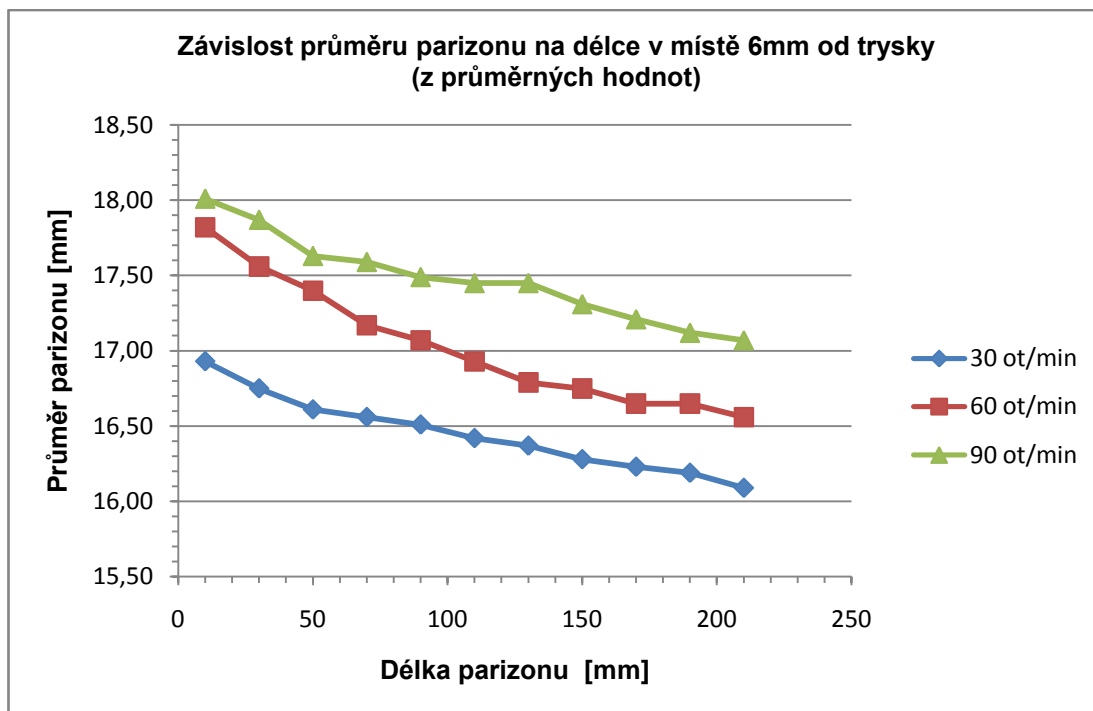
Obr. 3.10: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u materiálu Bralen RB 2-62

### 3.4.3 Materiál polypropylén Mosten GB 005



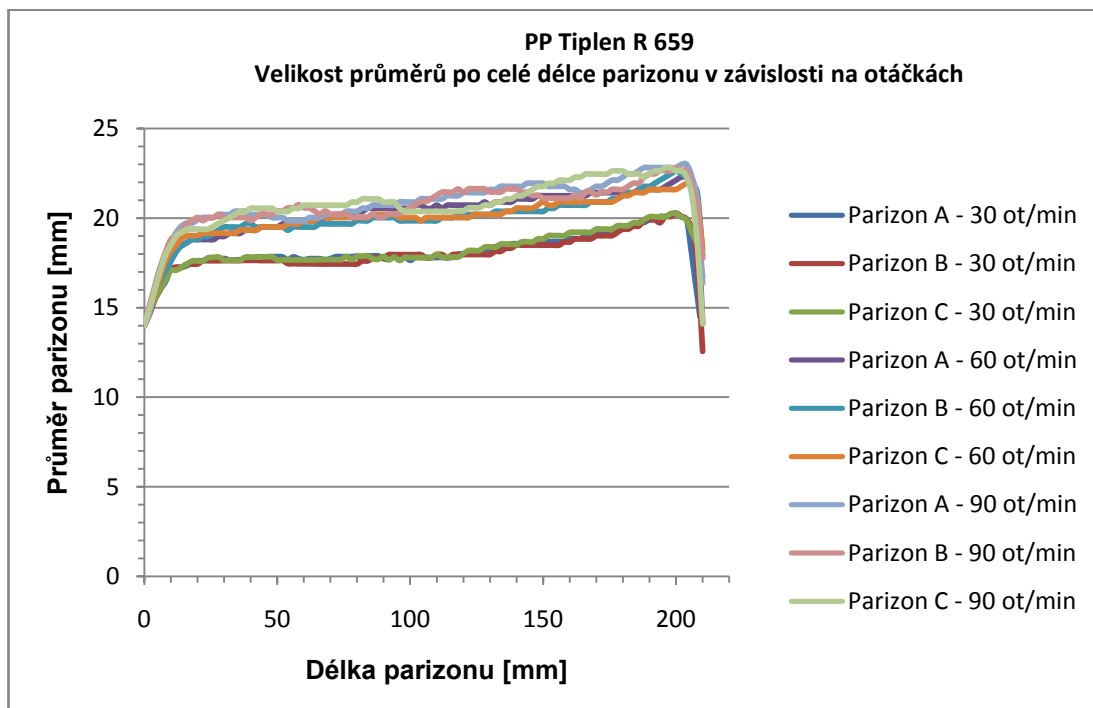
Obr. 3.11: Proměření profilů parizonů materiálu Mosten GB 005



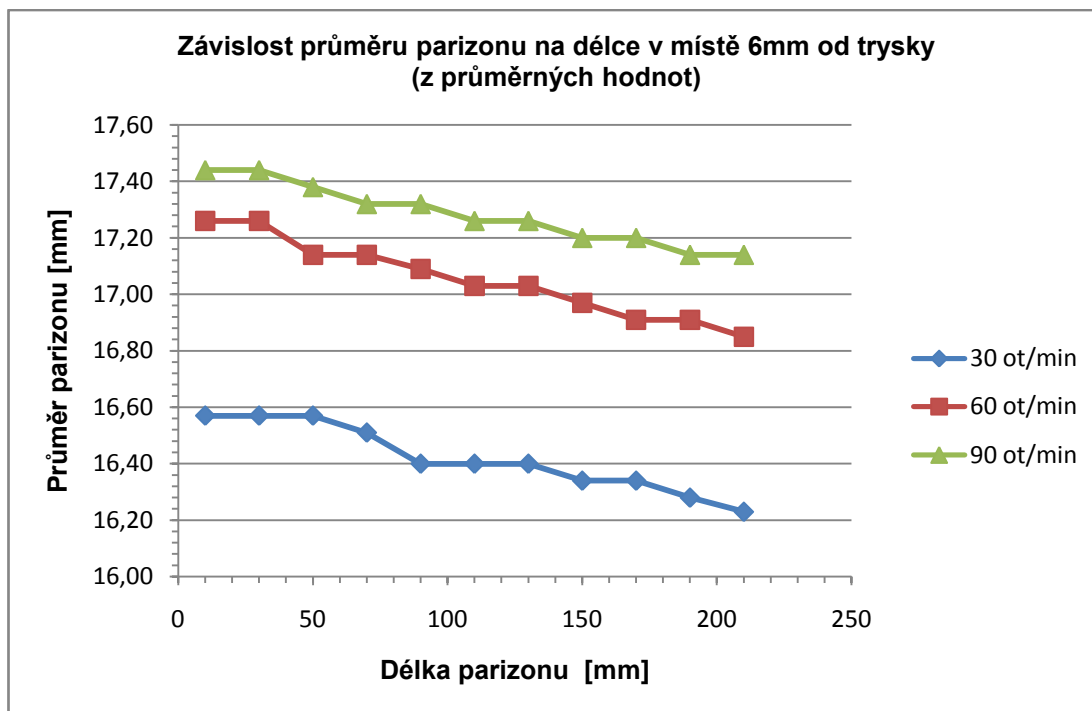


Obr. 3.12: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u materiálu Mosten GB 005

### 3.4.4 Materiál polypropylén Tiplen R 659



Obr. 3.13: Proměření profilů parizonů materiálu Mosten GB 005

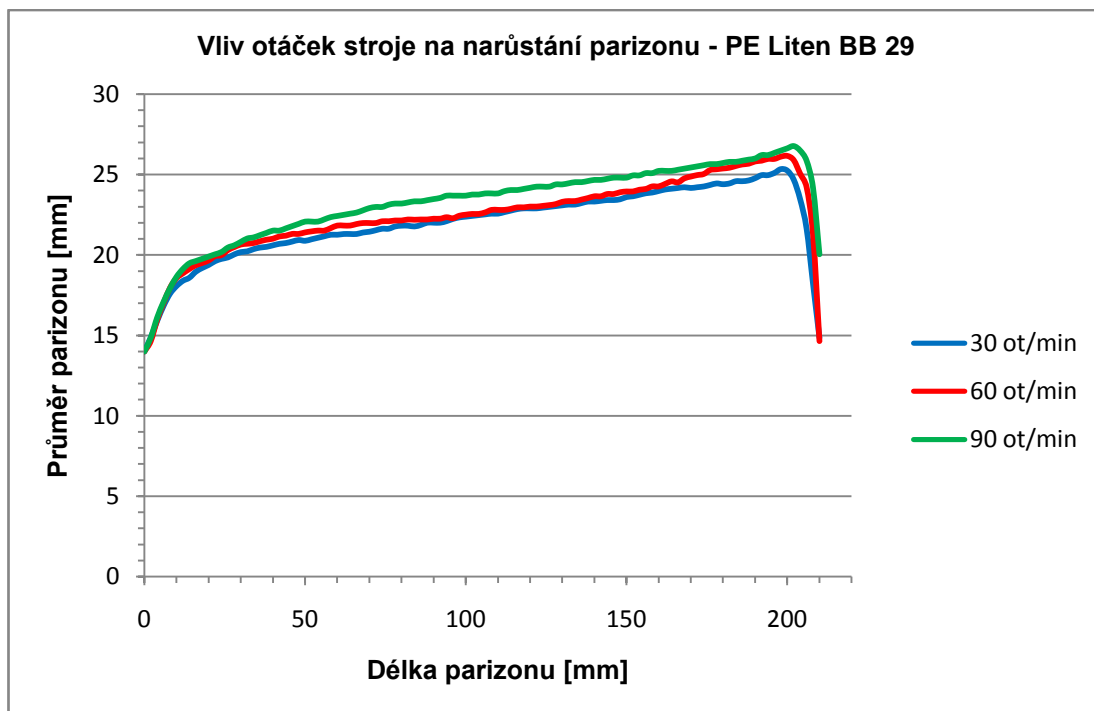


Obr. 3.14: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u materiálu Tiplen R 659

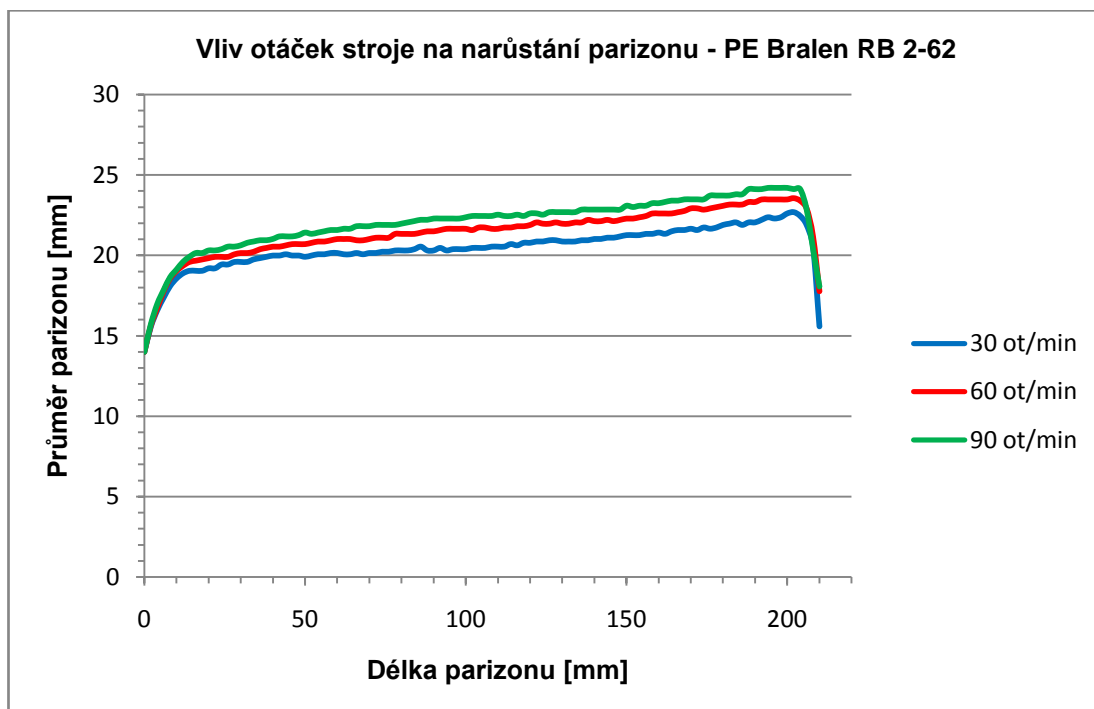
### 3.5 Hodnocení výsledků a jejich diskuse

Zprůměrováním hodnot z provedených experimentálních měření a z dat získaných proměřením celkového počtu 36 parizonů (uvedených v kapitole 3.4 experimentu) pro jednotlivé použité materiály při totožných technologických podmínkách byly jednak získány grafy závislosti narůstání průměru parizonu na otáčkách stroje (obr. 3.15 až obr. 3.18) a jednak můžeme učinit následující závěr:

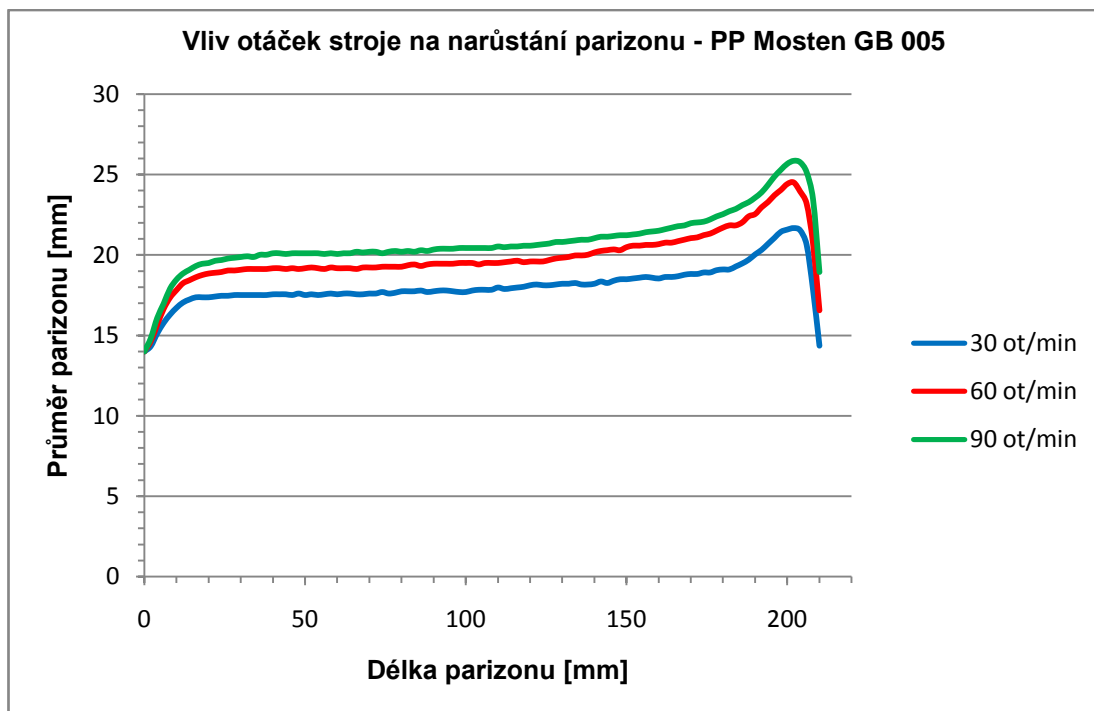
Z uvedených obrázků je patrný jasně prokazatelný vliv otáček stroje na narůstání průměru parizonu, a to u všech použitých materiálů. Zejména u polypropylénu je tento vliv značný. Pro teorii, ale i pro výrobní proces se potvrdil předpoklad, že jev narůstání lze jednoznačně ovlivňovat nastavením otáček na vyfukovacím stroji, což však není doposud žádným způsobem matematicky popsáno.



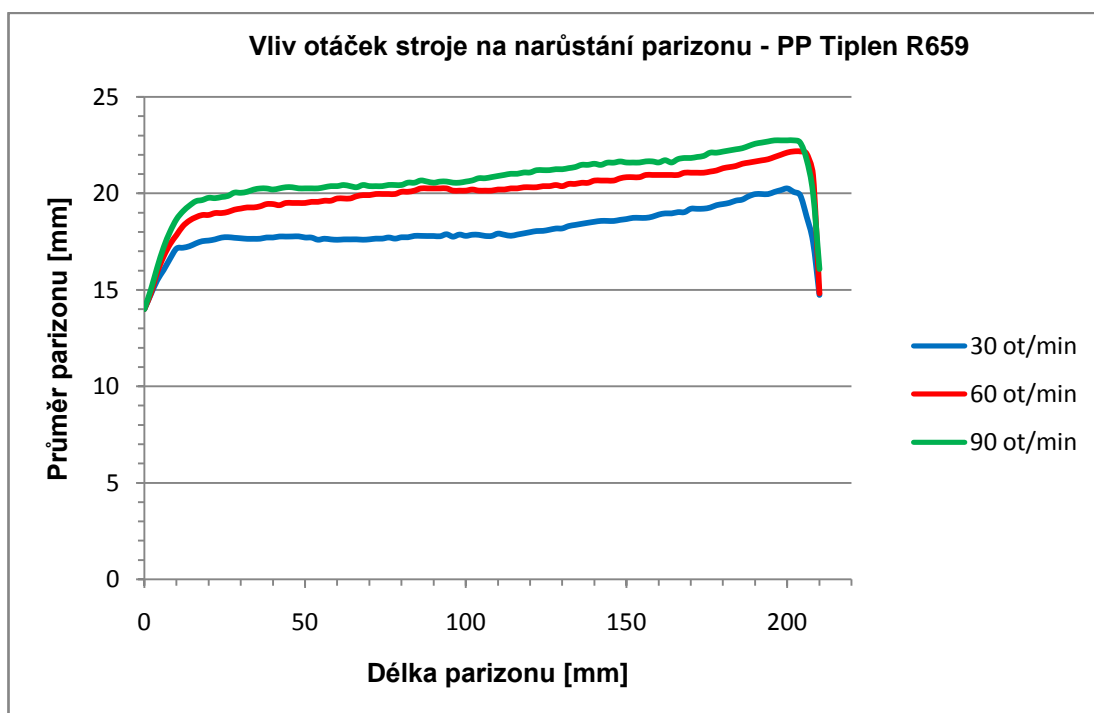
Obr. 3.15: Vliv otáček stroje na narůstání průměru parizonu u materiálu PE Liten BB 29



Obr. 3.16: Vliv otáček stroje na narůstání průměru parizonu u materiálu PE Bralen RB 2-62

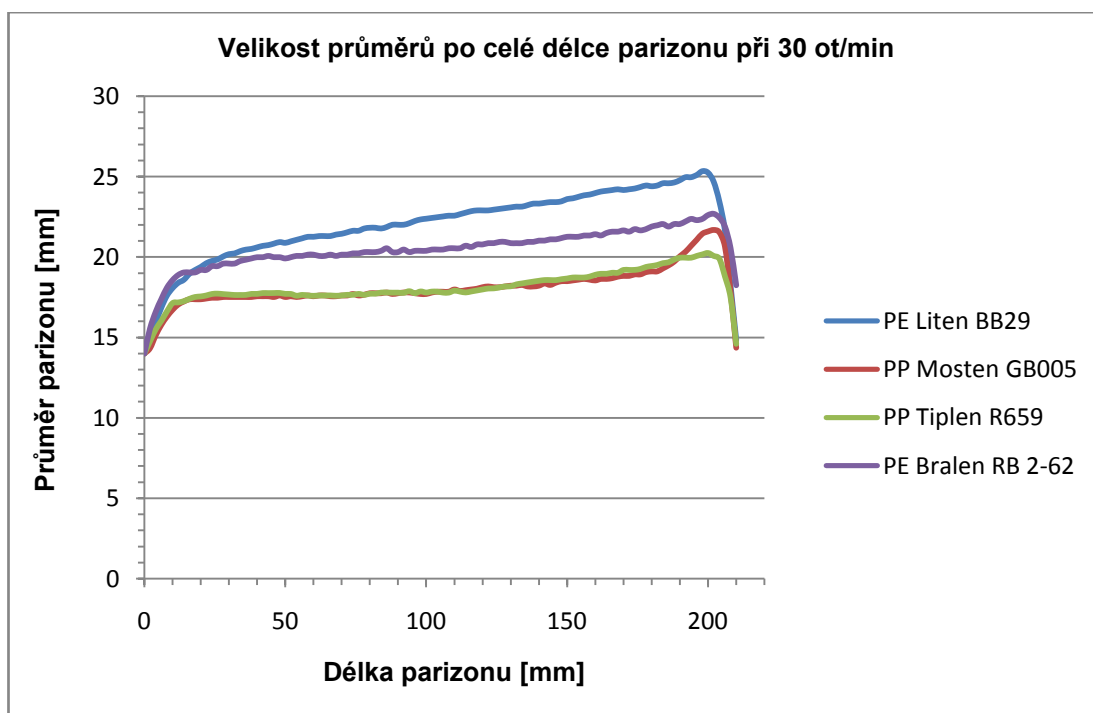


Obr. 3.17: Vliv otáček stroje na narůstání průměru parizonu u materiálu PP Mosten GB 005

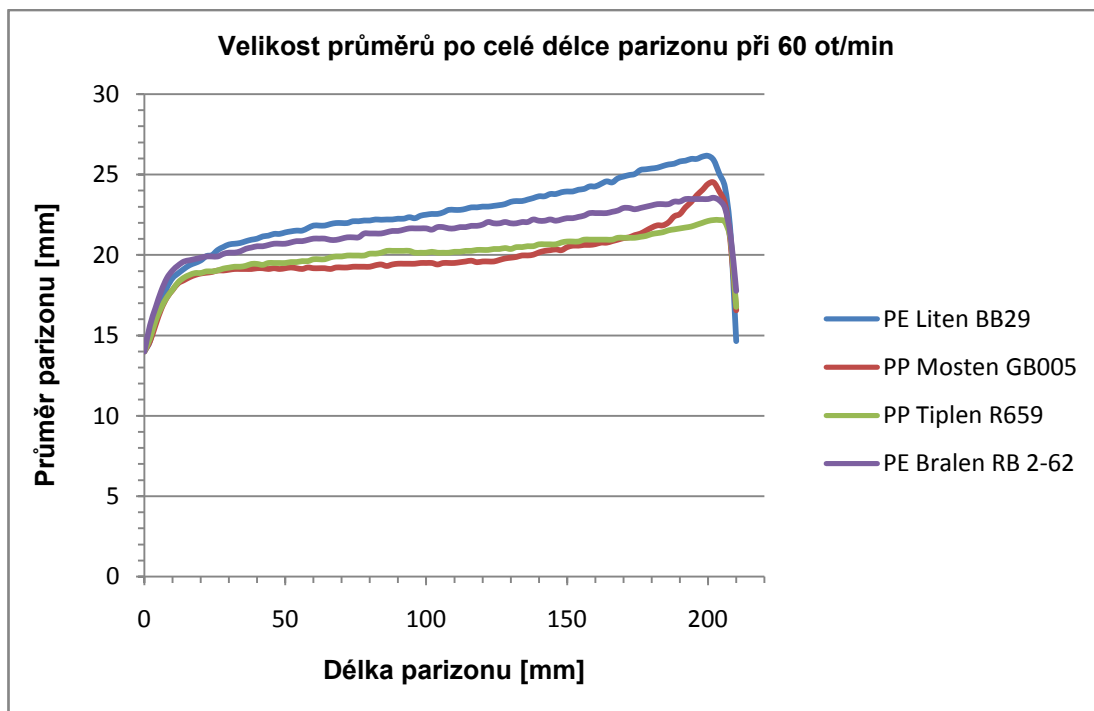


Obr. 3.18: Vliv otáček stroje na narůstání průměru parizonu u materiálu PP Tiplen R659

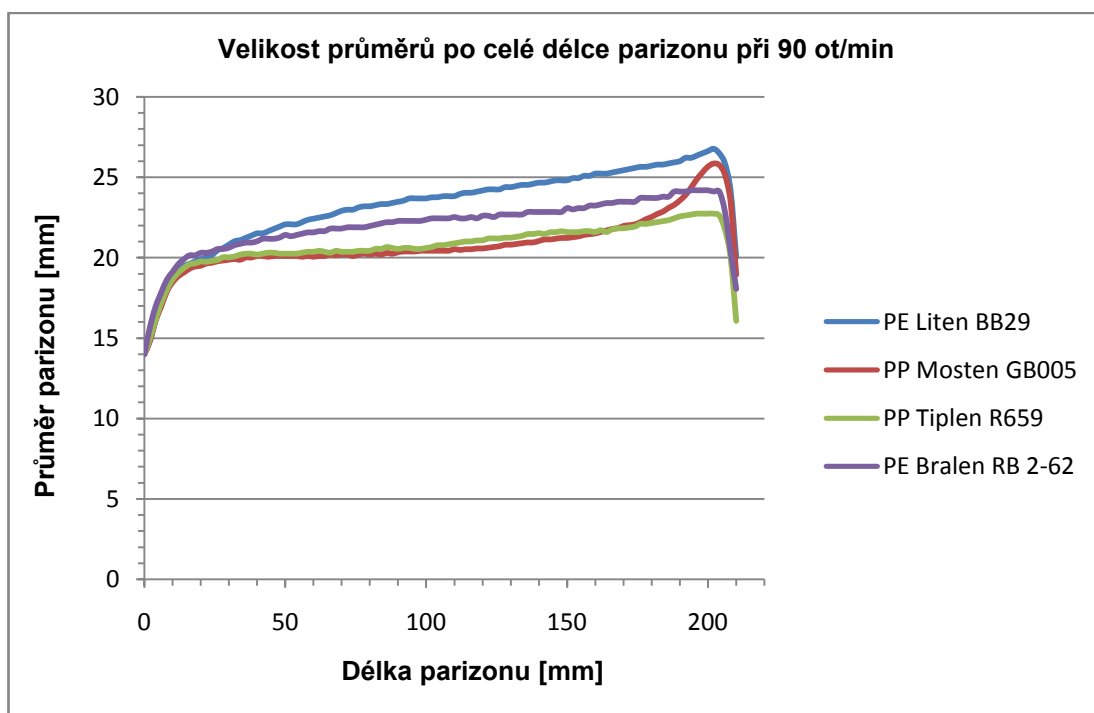
Vliv použitého materiálu na narůstání průměru parizonu je potom zřejmý z obr. 3.19 až obr. 3.21. Obrázky ukazují rozdílné tendence k narůstání průměru parizonu u jednotlivých materiálů. Experiment prokazuje skutečnost, že polyetylény vykazují větší míru narůstání oproti polypropylénu a to při všech použitých otáčkách stroje. Největší míru narůstání vykazuje vysokohustotní polyetylén Liten BB 29 od výrobce Unipetrol RPA Litvínov. Bralen RB 2-62 od výrobce Slovnaft Petrochemicals, s.r.o. Bratislava, zastupuje nízkohustotní polyetylén, který již nevykazuje tak velké narůstání jako HDPE, avšak míra jeho narůstání je oproti polypropylénu stále větší. Polypropylény Mosten GB 005 (výrobce Unipetrol RPA Litvínov) a Tiplen R659 (výrobce TVK Plc. Polymer Business Unit, Hungary) i přes rozdílný index toku taveniny vykazují srovnatelný přírůstek geometrie (narůstání). Z průběhů je patrný i rozdílný průběh narůstání u polypropylenu a polyetylénu. U polyetylénu, po počátečním prudkém nárůstu, dochází k pozvolnému ustálenému narůstání průměru. Oproti tomu u polypropylénu po prudkém počátečním nárůstu k dalšímu narůstání průměru již téměř nedochází. Závěrem lze tedy konstatovat, že vhodným výběrem materiálu lze zásadně ovlivnit míru narůstání průměru parizonu.



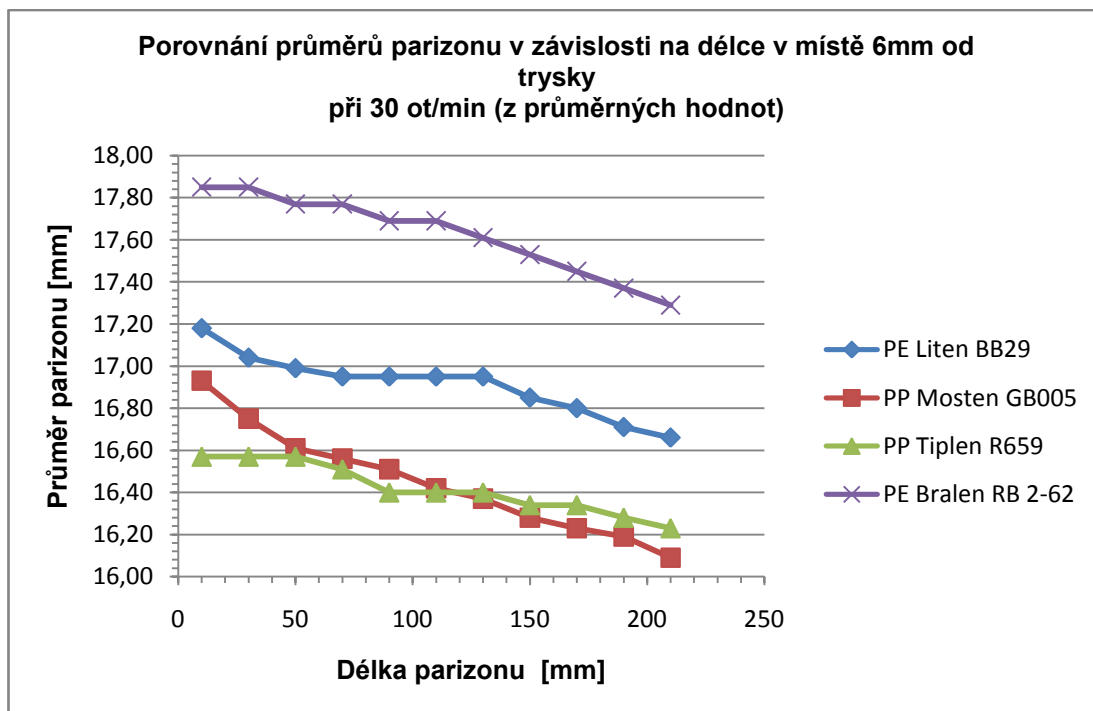
Obr. 3.19: Vliv materiálu na narůstání průměru parizonu při otáčkách stroje 30 ot/min



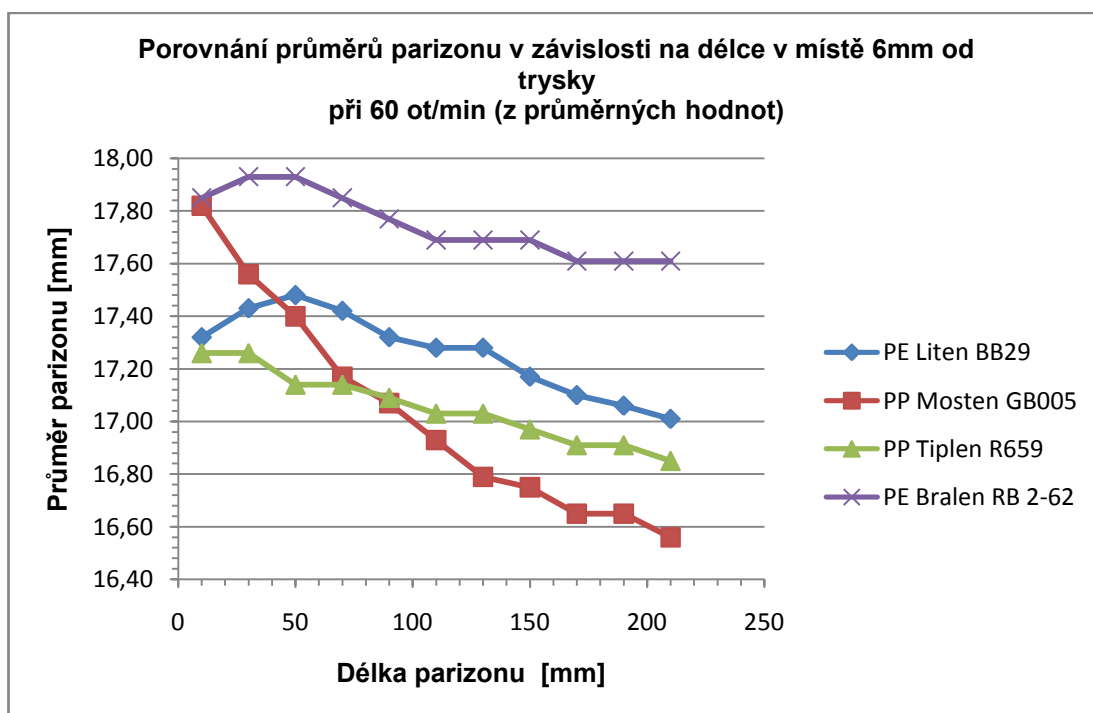
Obr. 3.20: Vliv materiálu na narůstání průměru parizonu při otáčkách stroje 60 ot/min



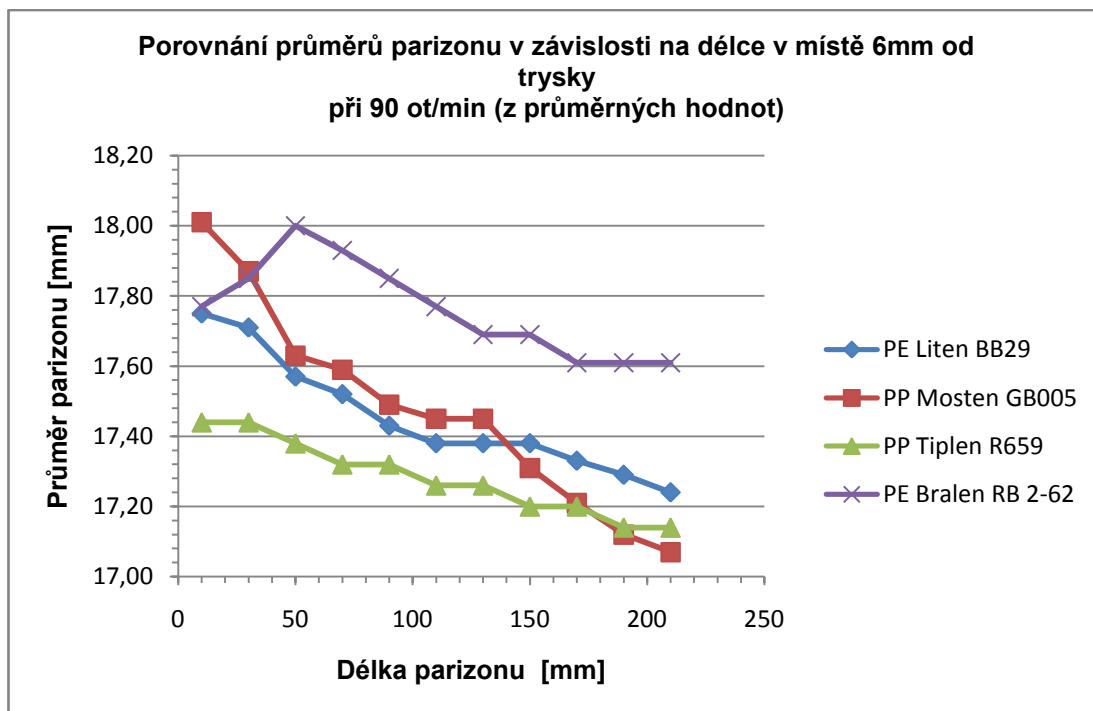
Obr. 3.21: Vliv materiálu na narůstání průměru parizonu při otáčkách stroje 90 ot/min



Obr. 3.22: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u různých materiálů, při otáčkách stroje 30 ot/min



Obr. 3.23: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u různých materiálů, při otáčkách stroje 60 ot/min



Obr. 3.24: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě pod hubicí u různých materiálů, při otáčkách stroje 90 ot/min

Na výše uvedených průbězích (obr. 3.22 až obr. 3.24) je ukázáno, jaký vliv má vzrůstající délka vytlačovaného parizonu na jeho průměr v určitém měřeném místě. Křivky v grafech mají klesající charakter, což potvrzuje skutečnost, že zvyšující se délka parizonu při současném působení gravitační síly, která způsobuje protahování a ztenčení parizonu, snižuje míru narůstání průměru parizonu a to při všech použitých otáčkách. Jednoduše řečeno, proces narůstání průměru parizonu je do určité míry kompenzován ztenčením parizonu při jeho protahování v důsledku vlastní tíhy.

Z grafů je dále patrné, že největší zmenšení průměru parizonu v důsledku rostoucí délky vykazuje PP Mosten GB 005 od výrobce Unipetrol RPA Litvínov, který má ze všech použitých materiálů nejvyšší index toku taveniny. Tento závěr jenom dokazuje poznatek, že k většímu protahování a ztenčení parizonu jsou náchylné materiály s vyšším indexem toku taveniny.



### **3.6 Matematický popis jevu - narůstání průměru parizonu**

Tato část diplomové práce se zabývala nalezením určité matematické či statistické metody, kterou by bylo možné zpracovat naměřená data a jejímž výsledkem by bylo nalezení jednoduchého empirického resp. matematického vztahu. Tento empirický vztah by měl umožňovat rychlý „odhad“ průměru parizonu v závislosti na určitých technologických podmínkách a druhu použitého materiálu.

#### **3.6.1 Regresní analýza [22]**

K nalezení matematického vztahu popisu narůstání – změny geometrie - v závislosti na určitých technologických parametrech byla vybrána metoda regresní analýzy.

Regresní analýza je souhrn statistických metod a postupů, určených k detailnímu pochopení závislostí mezi dvěma či více proměnnými. Slouží k odhadu hodnot nebo středních hodnot nějaké proměnné odpovídajících určitým hodnotám jedné nebo více vysvětlujících proměnných.

Regresní analýzu lze rozdělit na dva základní typy - na jednoduchou regresní analýzu a vícenásobnou regresní analýzu. Jednoduchá regresní analýza popisuje závislost dvou číselných proměnných, z nichž jedna je příčina (vysvětlující proměnná) a druhá je důsledek (vysvětlovaná proměnná). Vícenásobná regresní analýza popisuje závislost více číselných proměnných, z nichž více je příčinami (vysvětlující proměnné) a jen jedna je důsledek (vysvětlovaná proměnná).

#### **3.6.2 Výběr vhodného regresního modelu [22]**

Regresní model je zjednodušeným zobrazením reality. Závislost se snaží popsat pomocí konkrétní rovnice (v grafu určitou křivkou). Regresní model zahrnuje dvě složky:

- Deterministická složka – vliv vysvětlující proměnné
- Náhodná složka – všechny ostatní (nepopsané) vlivy

Deterministická složka popisuje závislost pouze mezi hlavními proměnnými. Tedy těmi, co jsou pozorovány. Je vyjádřena konkrétní funkcí.

Náhodná složka popisuje závislost vysvětlované proměnné na neznámých nebo nepozorovaných proměnných a popisuje i vliv náhody. Nelze ji funkčně vyjádřit.

Výběr vhodného modelu je důležitým krokem regresní analýzy, protože má rozhodující vliv na kvalitu modelu. Nejvhodnějším modelem je takový model, jehož funkční hodnoty se nejvíce blíží hodnotám skutečným (naměřeným). Funkce procházející nejbližše všem bodům je vždy jen jedna a k jejímu nalezení slouží metoda nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců tedy v regresní analýze slouží jako nástroj k bodovému odhadu parametrů výběrové regresní funkce.

Existuje řada funkcí, u kterých lze jejich parametry pomocí metody nejmenších čtverců odhadnout:

- Regresní přímka
- Regresní parabola
- Regresní hyperbola
- Regresní polynom
- Regresní logaritmická funkce, atd.

Při volbě nejlepšího modelu lze použít dva postupy:

- Apriorní volba – model je zvolen na základě praktické nebo teoretické znalosti závislosti.
- Empirická volba – Nejvhodnější model se volí posouzením bodového grafu nebo pomocí nástrojů regresní analýzy. Pokud není počet pozorování příliš velký, nemusí tento postup vést k nalezení vhodné funkce pro popis závislosti v základním souboru a popisuje pouze závislost v souboru výběrovém.

K volbě regresního modelu pro popis narůstání průměru parizonu byla použita empirická volba. Po posouzení bodového grafu byla zvolena vícenásobná regresní analýza pomocí regresní logaritmické funkce.

Ve stručnosti jsem se snažil o to, abych navrhl co nejpřesnější, ale zároveň co nejjednodušší model, který by byl obecně platný a jeho parametry snadno interpretovatelné.

Obecný tvar vícenásobné regresní analýzy pomocí logaritmického modelu je následující:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 x_2 + \dots \beta_n x_n \quad (1)$$

*Kde značí:*      $\eta$ ... vysvětlovaná proměnná

$\beta$ ... koeficienty

$x$ ... vysvětlující proměnné

Protože míra narůstání průměru parizonu **D** se postupně mění s časem čili při konstantní rychlosti vytlačování s délkou parizonu, musí být délka parizonu zastoupena v rovnici jako jedna z vysvětlujících proměnných. Délkou **I** je zde myšlena vzdálenost místa zjišťovaného průměru od vytlačovací hubice. Jako další vysvětlující proměnnou jsou otáčky stroje **n**, protože jejich vliv na narůstání byl již prokázán v kapitole 3.5. Do rovnice se dále musí promítnout vliv použitého materiálu, a to takovým parametrem, který je vyjádřen číselně. Jako nejvhodnější materiálový parametr se jeví index toku taveniny **ITT**.

Tvar regresní analýzy po dosazení vysvětlujících proměnných do rovnice (1) potom je:

$$\varnothing D = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln I + \beta_2 \cdot n + \beta_3 \cdot ITT \quad (2)$$

*Kde značí:*      $\varnothing D$  ... vysvětlovaná proměnná

$\beta$ ... koeficienty

$I$ ... délka v místě zjišťovaného průměru

$n$ ... otáčky stroje

$ITT$ ... index toku taveniny použitého materiálu

### 3.6.3 Určení rovnice regresního modelu

S přihlédnutím na naměřená data a s ohledem na praxi bylo výhodnější provést regresní analýzu zvlášť pro polyetylény a zvlášť pro polypropylény. Tím vznikly dvě základní rovnice. Hlavními důvody tohoto rozhodnutí byly:

- rozdílné podmínky při stanovování ITT (rozdílná teplota)
- téměř totožná míra narůstání u polypropylénů i přes rozdílný ITT
- vyšší přesnost regresního modelu

Regresní analýza byla provedena pomocí softwaru Excel (verze 2007) v záložce data (data – analýza – analýza dat – regrese). V Excelu je řada statistických termínů špatně přeložena do češtiny, ale v následujících tabulkách (tab. 3.6 a 3.7) výstupů regrese jsou již uvedeny správné výrazy.

Tab. 3.6: Výstup regrese pro polyetylén

VÝSLEDEK

Regresní statistika	
Kor_koef	0,9043061
R <sup>2</sup>	0,8177696
R <sup>2</sup> upraveno	0,8169046
Sm_chyba	0,9455089
Pozorování	636

ANOVA

	St_vlnosti	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	3	2535,4697	845,1566	945,378971	4,13E-233
Rezidua	632	564,99983	0,893987		
Celkem	635	3100,4696			

	Koeficienty	Sm. chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95%	Horní 95%
Konstanta	13,516114	0,1935172	69,84452	2,208E-299	13,1361	13,89613	13,1361	13,89613
ln l	1,7825376	0,036974	48,21052	6,693E-214	1,7099308	1,855144	1,709931	1,855144
n	0,0232386	0,0015306	15,18266	1,2904E-44	0,0202329	0,026244	0,020233	0,026244
ITT	-0,679882	0,0405317	-16,7741	1,6516E-52	-0,7594753	-0,60029	-0,75948	-0,60029

Výsledná rovnice regresní logaritmické funkce pro PE je:

$$\varnothing D = 13,52 + 1,78 \cdot \ln l + 0,023 \cdot n - 0,68 \cdot ITT \quad (3)$$

*Kde značí:*      $\varnothing D$  ... průměr parizonu  
                   $l$  ... délka v místě zjišťovaného průměru  
                   $n$  ... otáčky stroje  
                   $ITT$  ... index toku taveniny použitého materiálu

Kvalita modelu se posuzuje podle koeficientu determinace  $R^2$ , který vystihuje, jak přesně data přiléhají ke křivce regresního modelu. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je model vhodnější. V tomto případě činí 0,818, to znamená, že model odpovídá naměřeným hodnotám na 81,8%. Jinak řečeno, daným modelem bylo vysvětleno 81,8% příčin změn průměru parizonu.

Tab. 3.7: Výstup regrese pro polypropylén

VÝSLEDEK

Regresní statistika	
Kor_koef	0,871555781
R <sup>2</sup>	0,75960948
R <sup>2</sup> upraveno	0,758468386
Sm_chyba	0,914803356
Pozorování	636

ANOVA

	St_volnosti	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	3	1671,266	557,0887	665,68514	4,104E-195
Rezidua	632	528,8988	0,836865		
Celkem	635	2200,165			

	Koeficienty	Sm. chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95%	Horní 95%
Hranice	11,85135333	0,201104	58,93146	5,755E-259	11,4564404	12,24627	11,45644	12,24627
ln l	1,183177706	0,035773	33,07433	5,356E-140	1,1129288	1,253427	1,112929	1,253427
n	0,044497011	0,001481	30,04743	7,016E-124	0,04158895	0,047405	0,041589	0,047405
ITT	-0,01317022	0,024183	-0,54461	0,58621422	-0,06065873	0,034318	-0,06066	0,034318

Rovnice regresní logaritmické funkce pro PP:

$$\varnothing D = 11,81 + 1,18 \cdot \ln l + 0,045 \cdot n - 0,013 \cdot ITT \quad (4)$$

*Kde značí:*  $\varnothing D$  ... průměr parizonu  
 $l$  ... délka v místě zjišťovaného průměru  
 $n$  ... otáčky stroje  
 $ITT$  ... index toku taveniny použitého materiálu

Ověření existence závislosti narůstání na ITT materiálu:

Testovaná hypotéza  $H_0: \beta_3 = 0$

Při rozhodování o tom, zda je hodnota testové statistiky v kritickém oboru, není nutné hledat kvantil t-rozdělení, ale je možné využít p hodnoty (Hodnota P). Je-li p-hodnota menší než  $\alpha$ ,  $H_0$  zamítneme na hladině významnosti  $\alpha$ . Protože p-hodnota byla rovna 0,586, byla tedy větší než  $\alpha = 0,05$ , znamená to, že platí  $H_0: \beta_3 = 0$ .

Tím bylo prokázáno, že míra narůstání u polypropylénu nezávisí na ITT a rovnici bylo možné zjednodušit odebráním členu ITT. Výsledná rovnice regresní logaritmické funkce pro PP je tedy:

$$\varnothing D = 11,81 + 1,18 \cdot \ln l + 0,045 \cdot n \quad (5)$$

*Kde značí:*  $\varnothing D$  ... průměr parizonu  
 $l$  ... délka v místě zjišťovaného průměru  
 $n$  ... otáčky stroje

Po provedené kontrole výpočtem se kvalita modelu po odebrání členu ITT z rovnice (4) nesnížila a činí 76%.

Pro úplnost byly regresní analýzou určeny rovnice pro jednotlivé materiály. Výsledky těchto analýz jsou uvedeny v následující tabulce spolu s obecnými rovnicemi:

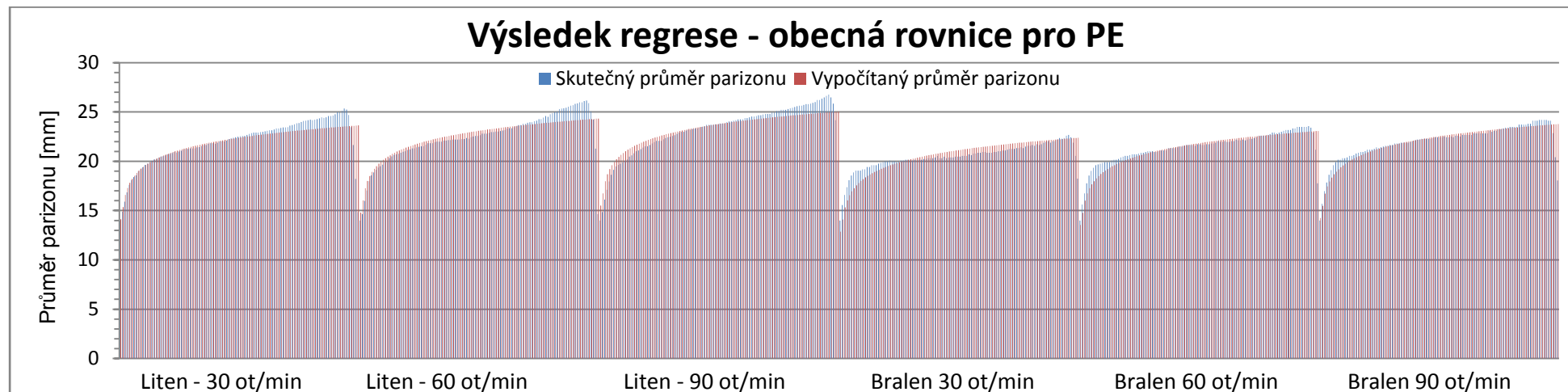
Tab. 3.8: Výsledky provedených regresních analýz

SOUHRN REGRESNÍCH ROVNIC		
OBECNÉ ROVNICE		
<i>materiál</i>	<i>rovnice</i>	<i>kvalita modelu</i>
polyetylén	$\varnothing D = 13,52 + 1,78 \cdot \ln l + 0,023 \cdot n - 0,68 \cdot ITT$	81,8%
polypropylén	$\varnothing D = 11,81 + 1,18 \cdot \ln l + 0,045 \cdot n$	76,0%
ROVNICE PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLY		
<i>materiál</i>	<i>rovnice</i>	<i>kvalita modelu</i>
Liten BB 29	$\varnothing D = 11,95 + 2,15 \cdot \ln l + 0,021 \cdot n$	82,1%
Bralen RB 2-62	$\varnothing D = 13,62 + 1,42 \cdot \ln l + 0,026 \cdot n$	86,0%
Mosten GB 005	$\varnothing D = 11,37 + 1,27 \cdot \ln l + 0,045 \cdot n$	72,8%
Tiplen R 659	$\varnothing D = 12,25 + 1,1 \cdot \ln l + 0,044 \cdot n$	80,8%
ROVNICE PRO POLYPROPYLENY PŘI KONST. OTÁČKÁCH		
<i>otáčky</i>	<i>rovnice</i>	<i>kvalita modelu</i>
30 ot/min	$\varnothing D = 14,33 + 0,87 \cdot \ln l$	71,8%
60 ot/min	$\varnothing D = 14,61 + 1,28 \cdot \ln l$	71,1%
90 ot/min	$\varnothing D = 14,62 + 1,39 \cdot \ln l$	70,1%
ROVNICE PRO POLYETYLENY PŘI KONST. OTÁČKÁCH		
<i>otáčky</i>	<i>rovnice</i>	<i>kvalita modelu</i>
30 ot/min	$\varnothing D = 15,19 + 1,6 \cdot \ln l - 0,81 \cdot ITT$	77,0%
60 ot/min	$\varnothing D = 14,79 + 1,78 \cdot \ln l - 0,56 \cdot ITT$	78,1%
90 ot/min	$\varnothing D = 14,76 + 1,97 \cdot \ln l - 0,67 \cdot ITT$	87,6%

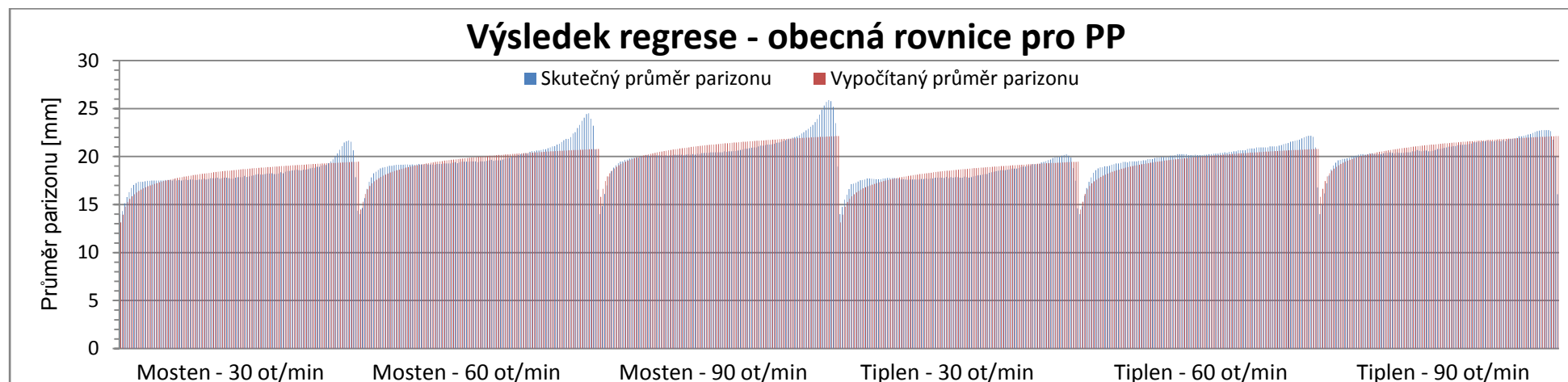
*Poznámka:*

*Regresní rovnice platí pouze pro vytlačovací hubice typu „V“ o průměru  $\varnothing 14\text{ mm}$  a parizon o délce cca 210 mm.*

Grafické výsledky z regresní analýzy za použití obecných rovnic jsou ukázány na obr. 2.25 a obr. 2.26 a grafické výsledky z rovnic určených pro jednotlivé materiály jsou na obr. 2.27 až obr. 2.30.

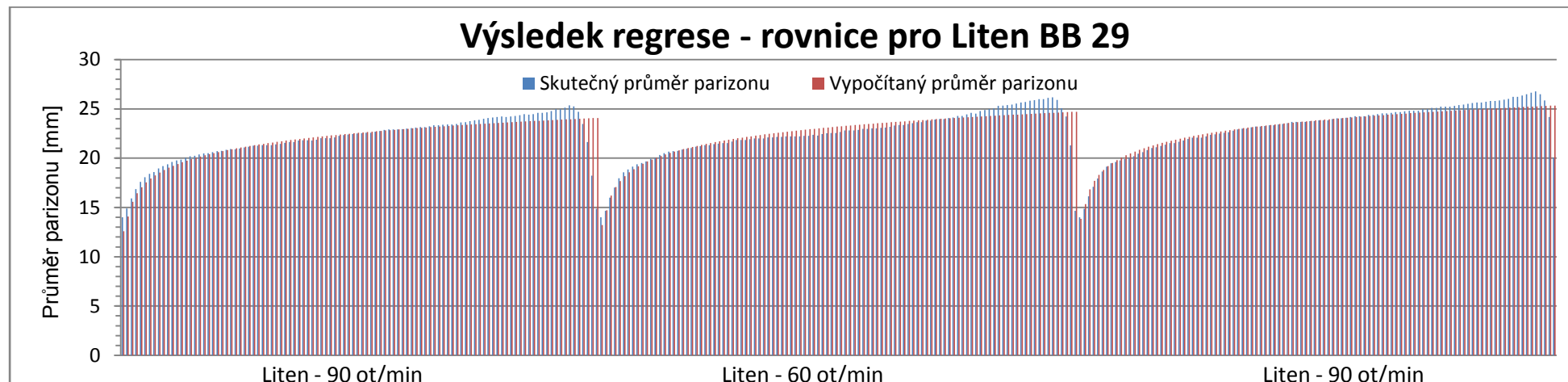


Obr. 3.25: Grafický výsledek regresní analýzy – obecná rovnice pro PE

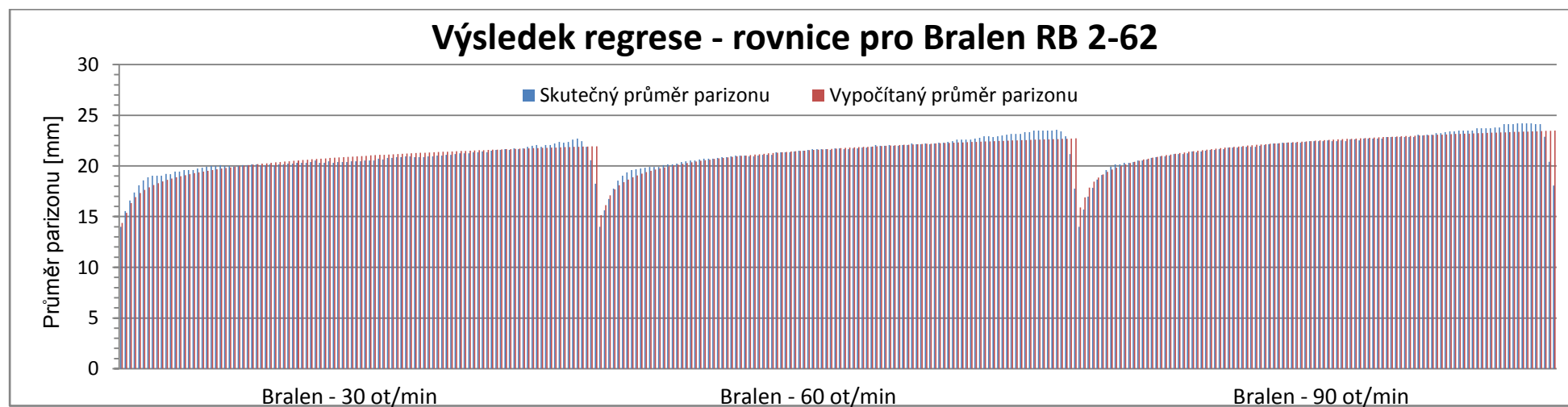


Obr. 3.26: Grafický výsledek regresní analýzy – obecná rovnice pro PP

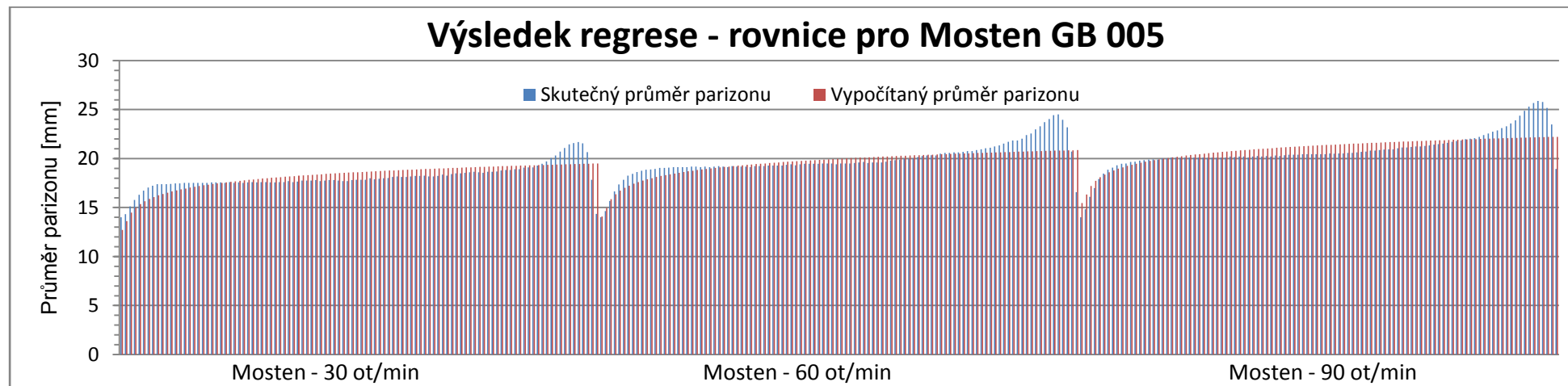




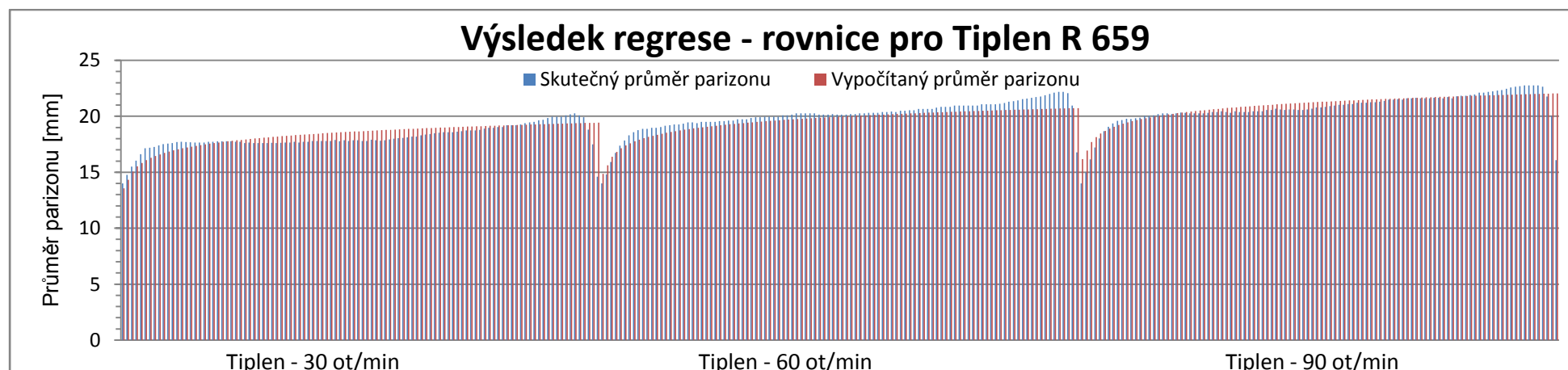
Obr. 3.27: Grafický výsledek regresní analýzy – rovnice pro PE Liten BB 29



Obr. 3.28: Grafický výsledek regresní analýzy – rovnice pro PE Bralen RB 2-62



Obr. 3.29: Grafický výsledek regresní analýzy – rovnice pro PP Mosten GB 005



Obr. 3.30: Grafický výsledek regresní analýzy – rovnice pro PP Tiplen R 659

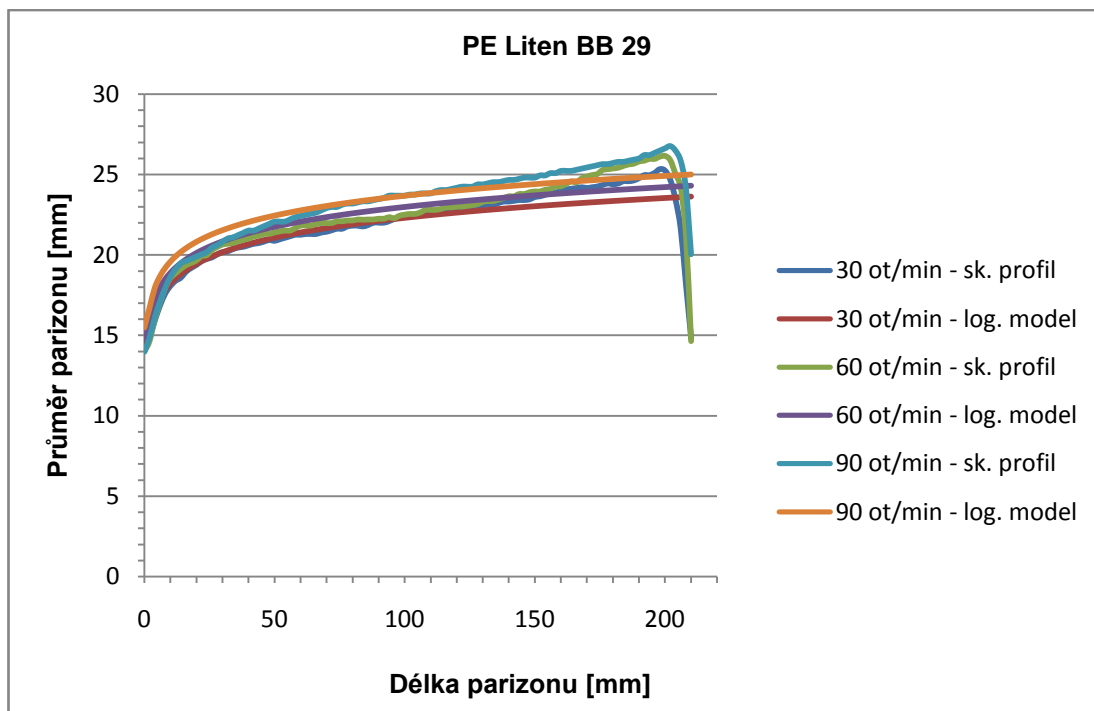
### 3.7 Hodnocení výsledků a jejich diskuse

Z grafických výstupů a průběhů skutečných vytlačovaných profilů parizonu, uvedených v kapitole 3.4, můžeme porovnáním s profily modelů vytvořených pomocí regresní analýzy v kapitole 3.6 učinit následující závěry:

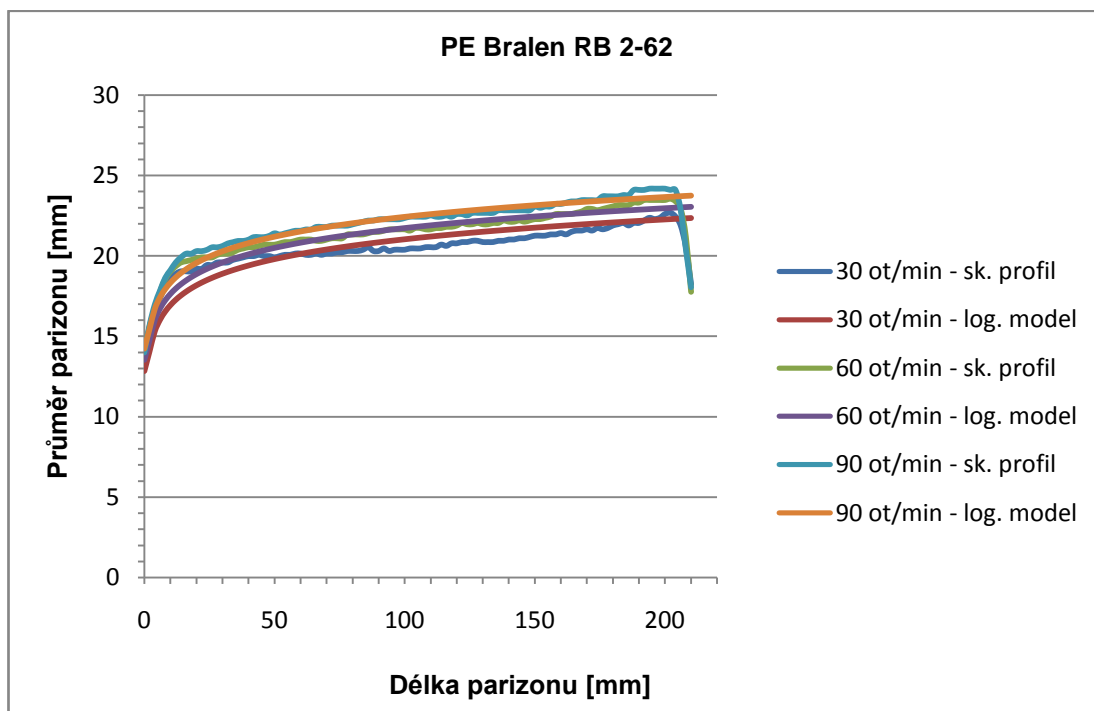
Na následujících obrázcích (obr. 3.31 až obr. 3.34) bylo provedeno srovnání skutečných profilů (naměřených průběhů) s profily vytvořených za pomoci logaritmických modelů. U logaritmických modelů byly použity obecné rovnice, uvedené v tab. 3.8. Z těchto porovnání je patrné, že logaritmický model více odpovídá průběhu narůstání průměru parizonu u polyetylénu oproti polypropylénu, což dokazuje i vyšší „kvalita“ regresního modelu u rovnice (3) platné pro polyetylény. Nižší „kvalita“ modelu u polypropylénu je způsobena právě rozdílným průběhem narůstání průměru parizonu, kdy po prudkém počátečním nárůstu k dalšímu narůstání již téměř nedochází.

Dále si z hlediska matematického vyhodnocení musíme všimnout koncových oblastí u materiálu PP Mosten GB 005 (obr. 3.27), ve kterých dochází k náhlému zvětšení průměru na konci parizonu, které logaritmický model nezohledňuje. Tento faktor však dle mého názoru nijak výrazně nesnižuje přesnost modelu ve střední části parizonu, která je z hlediska procesu (uzavření ve formě a následné vyfouknutí) nejdůležitější. Toto náhlé zvětšení průměru parizonu bylo navíc způsobeno utržením parizonu, které bylo použito pouze u tohoto materiálu a proto se u dalších materiálů nevyskytuje a tedy nijak neovlivňuje vlastní matematický popis procesu. Rovněž v průmyslové praxi k tomuto náhlému nárůstu průměru parizonu nedochází, protože k oddělení parizonu se na vyfukovacích strojích používá vyhřívaný nůž, který tento efekt nezpůsobuje.

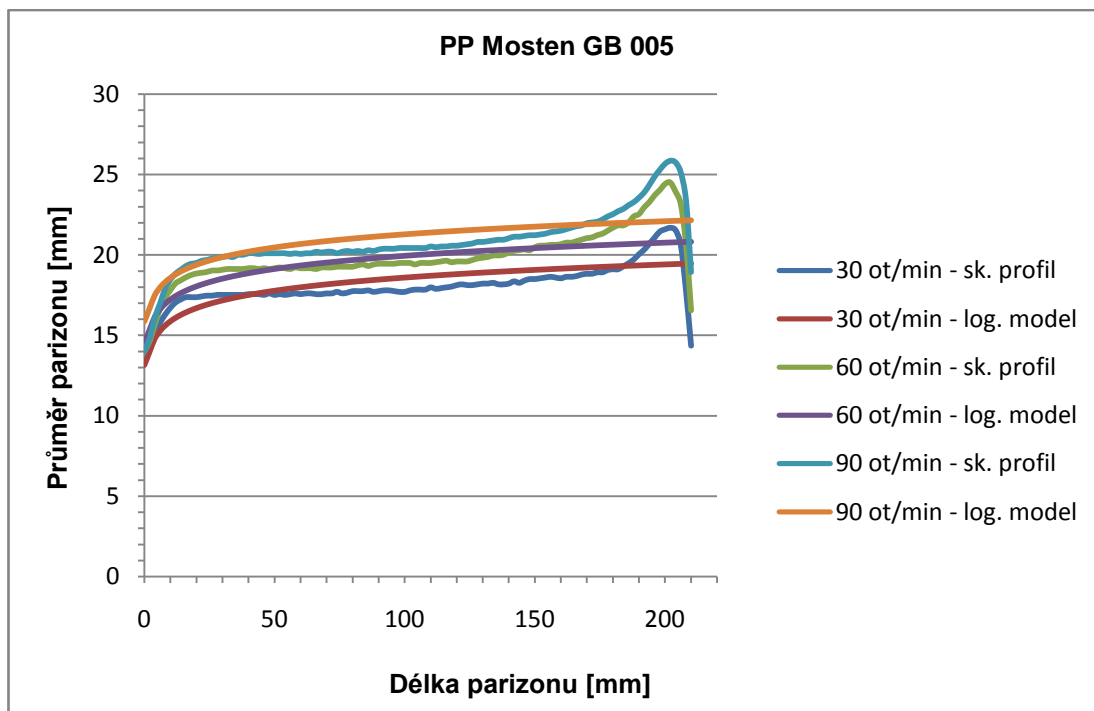
Výsledky regresních analýz také potvrzují tu skutečnost, že vliv otáček stroje je u polypropylénů větší, než u polyetylénů. Tento rozdíl dokazují nejenom grafy, ale i rozdílné velikosti koeficientů u otáček v jednotlivých rovnicích. Tyto koeficienty jsou u polypropylénů téměř dvojnásobné oproti koeficientům v rovnicích určených pro polyetylény.



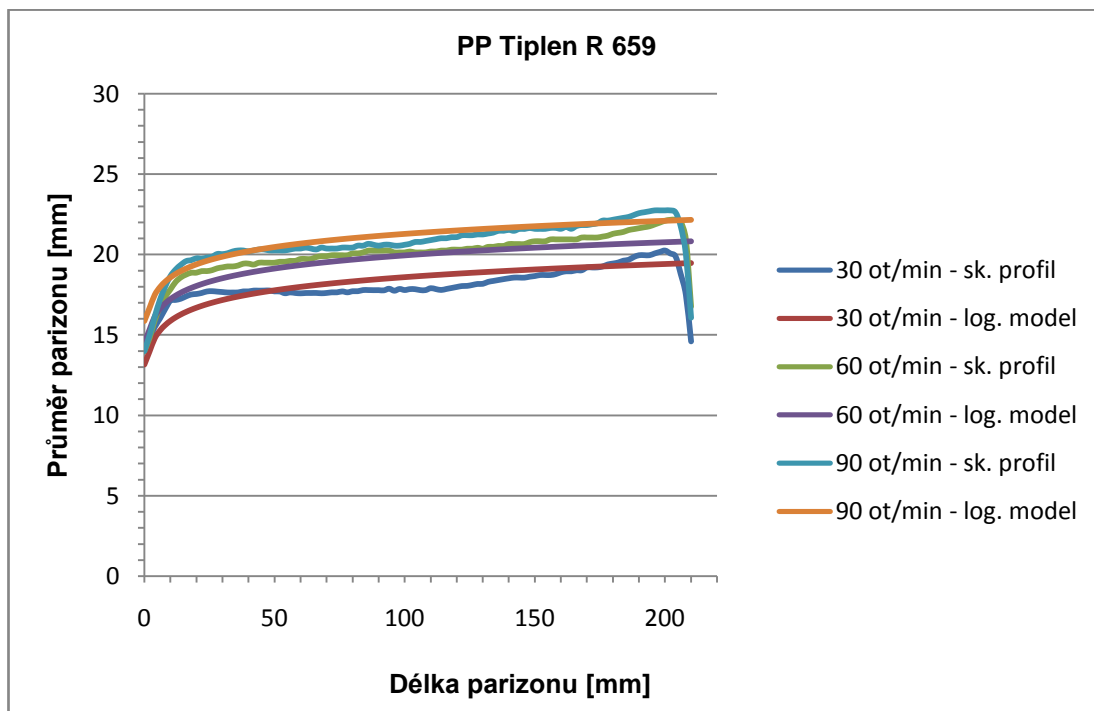
Obr. 3.31: Graf porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE Liten BB 29



Obr. 3.32: Graf porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE Bralen RB 2-62



Obr. 3.33: Graf porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Mosten GB 005



Obr. 3.34: Graf porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Tiplen R 659

Ověření platnosti regresních rovnic bylo provedeno na obecné rovnici pro polyetylény (3) dosazením konkrétních vybraných hodnot. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 3.9).

Tab. 3.9: Zkouška výpočtem

Obecná rovnice pro polyetylény			
$\varnothing D = 13,52 + 1,78 \cdot \ln l + 0,023 \cdot n - 0,68 \cdot ITT$			
$\varnothing D$ [mm]	$l$ [mm]	$n$ [ot/min]	ITT [g/10min]
22,8	100	50	0,15
20,8	100	50	3
23,9	100	100	0,15
22,0	100	100	3

V dalších diplomových pracích bude provedeno experimentální ověření jednak účinnosti matematicky zjištěných empirických rovnic, ale hlavně ověření hodnot průměrů parizonů z tab. 3.9 pro uvedené otáčky (50 ot/min a 100 ot/min), použité pro zkoušku výpočtem a pro rozdílné tekutosti vytlačovaných typů polyetylénu. Stejným způsobem se bude postupovat i pro druhý hodnocený materiál - pro polypropylen.

## 4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo sledování rozměrových změn u vytlačovaného polotovaru extruzního vyfukování – parizonu. A to zejména parametrizace nárůstu (zvětšování) průměru parizonu v důsledku technologického procesu vytlačování objemu taveniny.

Diplomová práce se skládá z několika částí, z úvodu, teoretické části, experimentální části, vyhodnocení a závěru. V úvodu a v teoretické části diplomové práce byly shrnuty poznatky o procesu a technologii vytlačování a poznatky týkající se průvodních jevů extruzního vyfukování – narůstání a protahování parizonu.

Pro následný experiment, který je podrobně popsán v experimentální části diplomové práce, byl vybrán vyfukovací stroj GM 251 od společnosti GDK spol. s r.o. Karlovy Vary. Materiály pro experiment byly vybrány tak, aby svými vlastnostmi pokryly širokou škálu běžně používaných materiálů u technologie extruzního vyfukování. Jednalo se o Liten BB 29, Bralen RB 2-62, Mosten GB 005 a Tiplen R 659. V rámci experimentu byla z vyfukovacího stroje odstraněna forma, čímž se zlepšily podmínky pro sledování parizonu. Podmínky experimentu byly zvoleny tak, aby bylo možné popsat nejenom parametry zvoleného plastu (ITT), ale i parametry stroje (otáčky  $n$ ) a technologie s tím spojené. Snímání profilu parizonu bylo provedeno systémem ARAMIS. Byly snímány vždy tři parizony při jednotlivých otáčkách stroje. A to konkrétně při 30 ot/min, 60 ot/min a 90 ot/min. Teploty jednotlivých topných zón stroje byly nastaveny tak, aby odpovídaly doporučeným zpracovatelským teplotám, udávaných výrobcem pro jednotlivé vybrané materiály.

V poslední části diplomové práce je provedeno vyhodnocení získaných výsledků. Experiment potvrdil, že největší vliv na narůstání průměru parizonu má druh použitého materiálu. Z technologických parametrů mají významný vliv otáčky stroje a jsou tedy jedním z technologických parametrů, kterým lze narůstání průměru parizonu snadno eliminovat. Následně byly z naměřených dat pomocí regresní analýzy vytvořeny regresní modely. Tyto modely zohledňují vliv použitého materiálu a otáček stroje a je

jimi možné „odhadnout“ průměr parizonu v určitém místě po délce parizonu, což může být velmi žádoucí při optimalizaci procesu vyfukování.

V rámci této diplomové práce nebylo možné zcela prozkoumat tak obsáhlé téma, jakým je narůstání objemu taveniny vytlačovaného parizonu. Proto by bylo vhodné se tímto tématem nadále zabývat a získat tak ucelenější pohled na tuto problematiku. Další experimenty by měly být směřovány do oblasti vlivu průměru a délky vytlačovací hubice na narůstání a výsledné rozměry parizonu. Díky novým poznatkům o tomto vlivu by bylo možné zdokonalit a zpřesnit regresní rovnice a zároveň by došlo k rozšíření jejich platnosti a oblasti aplikace v průmyslové praxi.

V neposlední řadě by bylo vhodné detailněji prozkoumat vliv teploty taveniny na narůstání, protože teplota taveniny souvisí jednak s otáčkami šneku, ale také s tekutostí plastu a mohla by být dalším parametrem, kterým by se dal tento jev buď ovlivnit, nebo popsat.



## LITERATURA

- [1] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů – část 1. Liberec: TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3
- [2] [www.packaging-cz.cz](http://www.packaging-cz.cz) (únor 2009)
- [3] DUŠEK, P.: Monitorizace procesu vyfukování. Diplomová práce, TU v Liberci, 2008.
- [4] Materiály firmy GDK
- [5] [www.gdk.cz](http://www.gdk.cz) (únor 2009)
- [6] LENFELD, P.: Technologie II. – část 2. Zpracování plastů. Liberec: TU v Liberci 2005. ISBN 80-7372-037-X.
- [7] [www.fluent.com](http://www.fluent.com) (březen 2009)
- [8] ROSATO, D. – ROSATO, A. – Di MATTIA, D: Blow holding handbook. Munich 2004: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-22017-8
- [9] THIELEN, M: Extrusion Blow Molding. Munich 2001: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-21948
- [10] LENFELD, P.: Inovace konstrukce vyfukovacího stroje GM 2500 a zvyšování efektivity technologie extruzního vyfukování – technická studie. Liberec 2009
- [11] [www.rikutec.de](http://www.rikutec.de) (březen 2009)
- [12] LENFELD, P. a kolektiv: Strojírenská technologie – vybrané prezentace, TU v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-326-2
- [13] BĚHÁLEK, L.: Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi. - za podpory projektu In-TECH (reg.č. CZ.04.1.03/3.2.15.2/0215) Evropského sociálního fondu (ESF projekt v Opatření 3.2)
- [14] [www.polymerwide.com](http://www.polymerwide.com) (březen 2009)
- [15] [www.chemopetrol.cz](http://www.chemopetrol.cz) (únor 2009)
- [16] [www.slovnaft.sk](http://www.slovnaft.sk) (únor 2009)
- [17] KŮSA, P.: Vliv konstrukce vstupní zóny na výkonové charakteristiky plastikační jednotky vyfukovacího stroje. Liberec: TU v Liberci, 2003. V45/03S
- [18] Časopis Transfer 01/2006
- [19] [www.gom.com](http://www.gom.com) (březen 2009)



- [20] [www.3d-digitizing.eu](http://www.3d-digitizing.eu) (březen 2009)
- [21] [www.mediacy.com](http://www.mediacy.com) (březen 2009)
- [22] [www.volny.cz/popelka\\_jan/statistika](http://www.volny.cz/popelka_jan/statistika) (duben 2009)

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 5.6 2009

.....

Jiří Habr

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: The 5<sup>th</sup> of June, 2009

.....

Jiří Habr